

Ein Beitrag zur Simulation der Sichtfreihaltung an Personenkraftwagen

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von

Daniel Demel, M. Sc.

aus Gießen

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea
1. Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner
2. Mitberichterstatter:	Honorarprof. Dr.-Ing. Thomas Schütz
Tag der Einreichung:	01.02.2021
Tag der mündlichen Prüfung:	20.04.2021

Darmstadt 2021

D 17

Demel, Daniel:

Ein Beitrag zur Simulation der Sichtfreihaltung an Personenkraftwagen
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUPrints: 2021

Tag der mündlichen Prüfung: 20.04.2021

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-176160

URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/17616>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von TU Prints,
E-Publishing-Service der Technischen Universität Darmstadt
<https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de> | tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Veröffentlicht unter CC BY-NC-ND 4.0 International

Namensnennung - Keine kommerzielle Nutzung - Keine Bearbeitung

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Doktorandenprogramms ProMotion der BMW Group in München und in enger Kooperation mit dem Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt zuallererst meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. **Cameron Tropea**, ehemaliger Fachgebietsleiter Strömungslehre und Aerodynamik der Technischen Universität Darmstadt, für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die Schaffung idealer Bedingungen für eine Industriepromotion, sein Interesse an der Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferats. Zudem möchte ich mich für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen und Anregungen, die maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben, sowie die weitergehende Betreuung nach Eintritt in den Ruhestand von Herzen bedanken. Auf der universitären Seite danke ich ebenso Frau Prof. Dr.-Ing. **Jeanette Hussong**, Herrn Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. **Suad Jakirlić** und Herrn Apl. Prof. Dr. **Ilia Roisman** für das Interesse an dieser Arbeit und den bereichernden Austausch.

Herrn Prof. Dr.-Ing. **Andreas Wagner**, Inhaber des Lehrstuhls Kraftfahrwesen am Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart der Universität Stuttgart und Vorstandsmitglied des unabhängigen Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart, danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats und dem damit verbundenen Einsatz.

Mein außerordentlicher Dank gilt meinem Betreuer bei der BMW Group, Herrn Honorarprof. Dr.-Ing. **Thomas Schütz**, für die Initiierung der Arbeit, das vertrauensvolle Verhältnis und die regelmäßigen Rücksprachen, die entscheidend zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben. Gleichzeitig möchte ich mich für sein überaus großes Interesse an meinem Fortschritt sowie die Übernahme von Korreferat und Lektorat bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei den Kolleginnen und Kollegen der Aerodynamikentwicklung der BMW Group für die gegenseitige Unterstützung und Wertschätzung, den offenen Austausch sowie das hervorragende Arbeitsklima in den vergangenen Jahren. Besonders hervorheben möchte ich den Abteilungsleiter, Herrn Dipl.-Ing. **Sven Klußmann**, für das entgegengebrachte Vertrauen und die Bereitstellung von Budget und Ressourcen sowie Herrn Dipl.-Ing. **Holger Gau** für die Unterstützung, die hilfreichen Diskussionen und die wertvollen Anregungen. Zugleich wurde mir eine optimale Einbindung ins Unternehmen ermöglicht.

Den Kolleginnen und Kollegen von Modelltechnik und Prüfstandsbetrieb danke ich für die Unterstützung bei dem Aufbau und der Durchführung von Versuchen.

Abschließend geht mein besonderer Dank an meine Familie und Freunde für den Rückhalt und die großartige Unterstützung vor und während dieser Zeit. Ohne euch wäre dieses Dissertationsprojekt nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Neben den klassischen Themen der Aerodynamik, wie der Reduktion des Luftwiderstands oder des Geräuschpegels in der Fahrgastzelle, gehört die Sichtfreihaltung zu den aerodynamischen Aufgaben bei der Fahrzeugentwicklung. Die Sicht der Fahrzeugführenden auf die Fahrbahn und das Umfeld sowie die Funktionen diverser Sensoren am Fahrzeug müssen zu jeder Zeit und selbst unter widrigen Wetterverhältnissen sichergestellt werden. Dazu werden sowohl aktive Maßnahmen wie Scheibenwischer oder Reinigungssysteme als auch passive Maßnahmen wie Wasserfang- und -führungskonzepte ausgelegt.

Die Überprüfung der Maßnahmen erfolgt meist experimentell im Umweltwindkanal, in dem verschiedene Wetterszenarien nachgestellt und untersucht werden können. Da zur Durchführung solcher Tests ein Prototyp benötigt wird, finden diese erst in einer späten Fahrzeugentwicklungsphase statt. Zu diesem Zeitpunkt ist jede notwendige Geometrie Anpassung äußerst kostenintensiv und nur schwer umzusetzen. Aus diesem Grund und im Zuge von verkürzten Entwicklungszyklen wächst der Wunsch nach einer Methodik zur Simulation des externen Wassermanagements in einer frühen Entwicklungsphase. Zahlreiche Veröffentlichungen verdeutlichen einerseits das enorme Potential von numerischen Simulationen und andererseits den Bedarf an der Weiterentwicklung von Mehrphasenmodellen.

Numerische Strömungssimulationen ermöglichen einen detaillierten Einblick in das Strömungsfeld und helfen beim Auffinden von Optimierungspotentialen, ohne einen physischen Prototyp zu benötigen. Einphasige Strömungssimulationen wurden bereits umfassend validiert und werden heute erfolgreich im Fahrzeugentwicklungsprozess eingesetzt. Mehrphasenströmungen hingegen sind wesentlich komplexer und weniger gut verstanden. Trotz der in den letzten Jahrzehnten enorm gestiegenen Rechenleistung stellen mehrphasige Strömungssimulationen weiterhin eine Herausforderung dar. Das Ziel der Promotion ist neben dem Wissensaufbau im Bereich der Mehrphasensimulationen ein Verfahren zur Abschätzung des externen Wassermanagements in frühen Entwicklungsphasen zu erarbeiten. Zur Realisierung einer solchen Berechnung und zur Berücksichtigung der verschiedenen Längen- und Zeitskalen werden mehrere Mehrphasenmodelle – im Besonderen Lagrange-Partikel, Fluidfilmmodell und Volume-of-Fluid-Methode – miteinander kombiniert.

Eine Voraussetzung für zuverlässige Ergebnisse bei Mehrphasensimulationen ist die korrekte Abbildung der turbulenten Luftströmung. Zur Überprüfung der Güte der Aerodynamiksimulation werden die berechneten Grenzschichtprofile nahe der Seitenscheibe mit Messungen im Windkanal gegenübergestellt. Dabei zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung, zumal das Hauptaugenmerk auf einem sehr kleinen Bereich innerhalb der Simulationsdomain mit dem gesamten Fahrzeug liegt. Die an einem generischen Testfall mit periodisch bewegter

Geometrie gewonnenen Erkenntnisse dienen als Basis für die Entwicklung einer Methodik zur realitätsnahen Abbildung der Scheibenwischerbewegung in einer Simulation. Die Bewegung der Scheibenwischer beeinflusst die instationäre Fahrzeugumströmung bis zum Heck, woraus eine geringe Erhöhung des Widerstandsbeiwerts resultiert. Validierungsmessungen im Windkanal mit und ohne Scheibenwischerbewegung bestätigen für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten sowohl den Betrag als auch die Richtung der von den Simulationen vorhergesagten Änderung.

Nachdem gezeigt wurde, dass die einphasige Strömungssimulation mit bewegten Scheibenwischern plausible Werte liefert und das Experiment gut abbildet, werden in einem weiteren Zwischenschritt zur gesamtheitlichen Scheibenwischersimulation vom Fahrzeug abgeleitete, mehrphasige Grundlagenexperimente und -simulationen durchgeführt. Hierbei wird die Komplexität reduziert und der Fokus auf ein spezielles Phänomen wie den Filmaufbruch gelegt. Für verschiedene Luftanströmgeschwindigkeiten und Wasservolumenströme wird in einem wasserfesten, vertikalen Windkanal der Filmaufbruch in Rinnsale untersucht. Pro Konfiguration wird der Versuch mehrfach wiederholt, um die Schwankung in den Benetzungsmustern festzuhalten. Durch den Vergleich der grafisch ausgewerteten Benetzungsmuster von Experiment und Simulation können Schwachstellen in den physikalischen Modellen zum Flüssigkeitstransport aufgedeckt und ausgebessert werden. Eine umgesetzte Verbesserung stellt das Verfahren zur Vorgabe eines Kontaktwinkelteppichs auf der Oberfläche dar, womit auch in den Simulationen eine gewisse Streubreite in den Benetzungsmustern erzeugt wird.

Um das Benetzungsverhalten auf der Fahrzeugoberfläche während der Scheibenwischerbewegung zu untersuchen, wird eine definierte Wassereintrittsquelle auf dem Dach des Versuchsfahrzeugs angebracht. Dadurch werden bekannte und in die Simulation übertragbare Randbedingungen geschaffen, die einen qualitativen und quantitativen Abgleich ermöglichen. Die Validierung der Simulationen erfolgt anhand von Benetzungsmustern auf der Front- und Seitenscheibe, Wasserverteilungen und Rinnsalfließgeschwindigkeiten für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten und A-Säulengeometrien. Dabei wird eine herausragende Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation erzielt. Zuletzt wird die entwickelte Simulationsmethodik hinsichtlich der Eignung zur Vorhersage der Seitenscheibenbenetzung während eines Beregnungsversuchs im Umweltwindkanal analysiert und bewertet. Hierbei wird insbesondere auf die Herausforderungen und die Unterschiede zum bewährten Sichtfreihaltungsversuch eingegangen.

Abstract

In addition to the classic topics of aerodynamics, such as reducing drag or cabin noise levels, maintaining a clear view through windows is one of the aerodynamic tasks in vehicle development. The driver's view of the road and the surroundings, as well as the functions of various sensors on the vehicle must be ensured at all times, even under bad weather conditions. For this purpose, active measures like windshield wipers or cleaning systems as well as passive measures like water trapping and guidance concepts are implemented.

These measures are usually tested experimentally in the environmental wind tunnel, where various weather scenarios can be simulated and investigated. To carry out such tests a prototype is required. Therefore, they can only be conducted in the late phase of the vehicle development process. However, at this stage any geometry adjustments that may be necessary are extremely cost-intensive and difficult to implement. For this reason and to shorten the development cycle, there is a growing desire for a virtual procedure to simulate external water management at an early stage. Numerous publications illustrate the enormous potential of numerical simulations while stressing the need for further development of multiphase models.

Numerical flow simulations enable a detailed insight into the flow field and help to identify potentials for optimization without needing a physical prototype. Single-phase flow simulations have been extensively validated and are already being used successfully in the vehicle development process. Multiphase flows on the other hand are much more complex and less well understood. Despite the enormous increase in computational power in recent decades, multiphase flow simulations continue to pose a challenge. The aim of this doctoral thesis is to build up knowledge in the field of multiphase simulations and to develop a procedure for estimating the external water management in early development phases. In order to realize such a calculation and to consider the different length and time scales several multiphase models – namely Lagrangian particles, fluid film model and volume of fluid method – are combined.

A requirement for reliable results of multiphase simulations is the correct prediction of the turbulent air flow. To verify the quality of the aerodynamics simulation, the calculated boundary layer profiles near the side window are compared with measurements in the wind tunnel. A very good agreement is shown, especially since the main focus is on a very small area within the simulation domain with the entire vehicle. The knowledge gained from a generic test case with periodically moving geometry serves as a basis for the development of a methodology for a realistic representation of the windshield wiper movement in a simulation. The movement of the windshield wipers influences the unsteady flow up to the rear of the

vehicle. This leads to a slight increase in the drag coefficient. Validation measurements in the wind tunnel with and without wiper movement at different air flow velocities confirm both the amount and the direction of the change predicted by the simulations.

After it has been shown that the single-phase flow simulation with moving windshield wipers provides reasonable results and a good agreement with the experiment, basic multiphase experiments and simulations derived from a vehicle are carried out as an intermediate step towards holistic wiper simulations. Here, the complexity is reduced and the focus is placed on a specific phenomenon like the film breakup. The breakup of the film in rivulets is investigated for different air flow velocities and water volume flows in a waterproof vertical wind tunnel. For each configuration the experiment is repeated several times to record the fluctuations in the wetting patterns. By evaluating the wetting patterns of experiment and simulation graphically, weaknesses in the physical models for liquid transport can be detected and corrected. One such improvement that was implemented is the procedure for specifying a contact angle distribution on the surface, which results in a certain spread of the wetting patterns in the simulations.

To investigate the wetting behavior on a cars' surface during the wiper movement, a defined water inlet source was attached to the roof of the test vehicle. This is necessary to achieve a known set of boundary conditions which can be transferred to the simulation and to enable a qualitative and quantitative comparison. The validation of the simulations is done by means of wetting patterns on the front and side window, water distributions and flow velocities of the rivulets for different air flow velocities and A-pillar geometries. An excellent agreement between experiment and simulation is achieved. Finally, the developed simulation methodology is analyzed and evaluated with respect to its suitability for predicting the side window wetting during a rain test in the environmental wind tunnel. In particular, the challenges and the differences to the approved side window wetting test are discussed.

Publikationen

Teile der vorliegenden Arbeit wurden bereits in nachfolgenden Werken veröffentlicht:

- 19. Internationales Stuttgarter Symposium, 19.-20. März 2019, Forschungsinstitut für Kraftwesen und Fahrzeugmotoren in Stuttgart, Germany: Vortrag zu „Optimieren der Wasserführung: Eine simulative Herausforderung“ von Cameron Tropea (TU Darmstadt); Johannes Feldmann, Daniel Rettenmaier, Patrick M. Seiler (alle TU Darmstadt); Michael Ade (Daimler AG); Daniel Demel (BMW AG) [160]
- Tropea, Cameron; Feldmann, Johannes; Rettenmaier, Daniel; Seiler, Patrick M.; Ade, Michael; Demel, Daniel: External Water Management: A Predictive Challenge. In: 19. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik. Herausgegeben von Bargende, M.; Reuss, H.-C.; Wiedemann, J. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. ISBN: 978-3-658-25938-9, S.398-411. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-658-25939-6_35 [159]
- Wetting on Soft or Microstructured Surfaces. WE-Heraeus-Seminar, 11.-13. April 2019, Physikzentrum Bad Honnef, Germany: Vortrag zu „Wetting Questions in Vehicle External Water Management“ von Cameron Tropea (TU Darmstadt); Johannes Feldmann, Daniel Rettenmaier, Patrick M. Seiler (alle TU Darmstadt); Michael Ade (Daimler AG); Daniel Demel (BMW AG) [161]
- ProMotion Dialogtag, 30. Oktober 2019, Forschungs- und Innovationszentrum der BMW Group in München, Germany: Beitrag zu „Sichtfreihaltung“ von Daniel Demel (BMW AG) [36]
- Demel, Daniel; Feldmann, Johannes; Schütz, Thomas; Tropea, Cameron: Simulation der Regenwasserführung für eine bessere Sicht. ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 12/2019, DOI: <https://doi.org/10.1007/s35148-019-0144-6> [38]
- Demel, Daniel; Feldmann, Johannes; Schütz, Thomas; Tropea, Cameron: Simulating Rain Water Guidance for a Better View. ATZ Worldwide 12/2019, DOI: <https://doi.org/10.1007/s38311-019-0141-0> [37]
- Demel, Daniel; Kostorz, Peter; Schütz, Thomas; Grundmann, Sven: Einfluss der Scheibenwischerbewegung auf die instationäre Fahrzeugumströmung. ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 10/2020, DOI: <https://doi.org/10.1007/s35148-020-0316-4> [39]
- Demel, Daniel; Kostorz, Peter; Schütz, Thomas; Grundmann, Sven: Influence of Windshield Wiper Movement on Vehicle Aerodynamics. ATZ Worldwide 10/2020, DOI: <https://doi.org/10.1007/s38311-020-0289-7> [40]

-
- Haus der Technik: Fahrzeug-Aerodynamik Tagung. Neue Chancen und Herausforderungen durch Elektromobilität und CO₂-Gesetzgebung, 07.-08. Juli 2021, München, Germany: Vortrag zu „Validierung einer Methode zur Abbildung der Frontscheibenbenetzung eines Personenkraftwagens unter Einfluss der Scheibenwischerbewegung“ von Daniel Demel (BMW AG) [42]
 - Demel, Daniel; Schütz, Thomas; Tropea, Cameron; Hussong, Jeanette: Validierung einer Methode zur Abbildung der Frontscheibenbenetzung eines Personenkraftwagens unter Einfluss der Scheibenwischerbewegung. Textbeitrag für Haus der Technik Fahrzeug-Aerodynamik Tagung am 07.-08. Juli 2021 in München, Germany [43]
 - Demel, Daniel; Schütz, Thomas; Kölzer, Christian; Tropea, Cameron: Anwendungen für Mehrphasen-CFD am Fahrzeugexterieur. Beitrag in Fachzeitschrift Forschung im Ingenieurwesen, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10010-021-00480-z> [41]

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Kurzfassung	V
Abstract	VII
Publikationen	IX
1 Einleitung	5
2 Stand der Technik	7
2.1 Experimentelle Studien zur Sichtfreihaltung	8
2.2 Numerische Simulationen zur Sichtfreihaltung	11
3 Grundlagen	17
3.1 Fahrzeugkoordinatensystem	17
3.2 Aerodynamische Beiwerte	18
3.3 Kenngrößen von Mehrphasenströmungen	19
3.4 Begriffsdefinitionen zur Benetzung	21
3.5 Wasserpfad am Fahrzeugexterieur	25
3.6 Seitenscheibenbenetzung	27
4 Entwicklungswerkzeuge	31
4.1 Aerodynamische Entwicklungswerkzeuge	31
4.1.1 AEROLAB der BMW Group	31
4.1.2 Umweltwindkanal der BMW Group	32
4.2 Fluoreszenz und Filmhöhenbestimmung	34
4.2.1 Fluoreszenz	34
4.2.2 Filmhöhenbestimmung mittels Kalibrierlehre	35
4.3 Numerische Simulationswerkzeuge	38
4.4 Numerische Mehrphasenmodelle	39
4.4.1 Lagrange-Partikel	39
4.4.2 Fluidfilmmodell	41
4.4.3 Volume-of-Fluid-Methode	46
4.4.4 Hybrides Fluidfilm-Volume-of-Fluid-Mehrphasenmodell	49
4.5 Darstellung von Netzbewegungen	50
4.5.1 Netzverformung	52

4.5.2	Neuvernetzung	52
4.5.3	Overset-Mesh-Ansatz	52
4.6	Übersicht der durchgeführten Simulationsfälle	56
5	Voruntersuchungen	59
5.1	Strömungscharakteristik nahe Seitenscheibe und A-Säule	59
5.1.1	Strömungscharakteristik nahe der Seitenscheibe	59
5.1.2	Strömung um die A-Säule	69
5.2	Benchmark des Filmmodells anhand von Grundlagenversuchen	70
5.2.1	Experimentelles und numerisches Setup	71
5.2.2	Beobachtungen	73
5.2.3	Vergleich der Benetzungsmuster anhand ausgewählter Kenngrößen . .	75
5.2.4	Fazit	77
5.3	Testfall für Parameterstudien zur Scheibenwischersimulation	78
5.4	Vergleich der Gesamtfahrzeugsimulation mit verschiedenen Simulationen im Fahrzeugausschnitt	82
5.4.1	Druckbeiwert auf der Außenhaut	84
5.4.2	Geschwindigkeitsfelder in verschiedenen Schnittebenen	86
6	Scheibenwischermethodik	91
6.1	Validierungsexperiment mit Wasseraustrittskörper auf der Fahrzeugdachkante	91
6.1.1	Versuchsfahrzeug	92
6.1.2	Wasseraustrittskörper	92
6.1.3	Wasserfang- und -führungskonstruktion	93
6.1.4	Versuchsaufbau im Umweltwindkanal	95
6.2	Simulationsaufbau zur Scheibenwischerbewegung	96
6.2.1	Übertragung der Scheibenwischerbewegung in die Simulation	96
6.2.2	Erweiterung zur Mehrphasensimulation	99
6.2.3	Überblick der verwendeten Modelle	101
6.2.4	Hinweise zur Vernetzung der Simulationsregion	103
6.3	Aerodynamische Betrachtung der Scheibenwischerbewegung	105
6.4	Validierung der Scheibenwischermethodik bei einer Luftanströmung mit 0 m s^{-1} und 10 m s^{-1}	108
6.4.1	Qualitativer Vergleich von Experiment und Simulation	109
6.4.2	Quantitativer Vergleich von Experiment und Simulation	113
6.4.3	Untersuchungen bei Luftanströmung	119
6.4.4	Fazit zur Validierung	124
7	Übertragbarkeit auf Sichtfreihaltungsversuch	127
7.1	Simulation der im UWK eingebrachten Wasserpartikel	128
7.2	Phänomene der Seitenscheibenbenetzung	132
7.3	Vergleich Sichtfreihaltungsversuch im UWK mit Simulation	134
7.4	Untersuchung von unterschiedlichen A-Säulenvarianten mit der Simulationsme- thodik	137

8 Zusammenfassung und Ausblick	139
Literaturverzeichnis	143
Nomenklatur	157
Abbildungsverzeichnis	163
Tabellenverzeichnis	167

Automobilhersteller streben die Entwicklung von hochmodernen, effizienten Fahrzeugen an, die ein hohes Maß an Sicherheit und Komfort bieten und exzellente Fahreigenschaften bei einem ansprechenden Design besitzen. Die Sichtfreihaltung – insbesondere während einer Regenfahrt auf nasser Straße – ist daher im Fahrzeugentwicklungsprozess von großer Relevanz, da durch ihre Optimierung sowohl die Sicherheit als auch der Komfort der Fahrzeuginsassen verbessert werden. Benetzte Scheiben sowie daraus entstammende Lichtreflexionen an Wassertropfen oder Rinnsalen können die Sicht auf das Umfeld beeinträchtigen. Weiterhin verbleiben nach Verdunstung des Wassers oft Rückstände (z. B. Salzkruste im Winter) auf der Scheibe, die die Sicht bis zur nächsten Fahrzeugreinigung erschweren. Während die Frontscheibe durch die Scheibenwischer und das Reinigungssystem von Flüssigkeiten und Schmutz befreit werden kann, ist eine solche Reinigungseinheit für die Seitenscheibe nicht vorgesehen. In diesem Fall wird das Wasser durch den Einsatz von Wasserfang- und -führungskonzepten nahe der A-Säule gezielt abtransportiert, sodass die Seitenscheibe möglichst frei von einer Benetzung bleibt. Eine große Wasserfangleiste begünstigt die freie Sicht durch die Seitenscheibe, führt jedoch gleichzeitig zu einer Erhöhung des Luftwiderstands. Da bei der Gestaltung der A-Säule neben den Anforderungen an Aerodynamik und Sichtfreihaltung auch die von Design und Akustik berücksichtigt werden müssen, stellt das umgesetzte Wasserfang- und -führungskonzept meist einen Kompromiss aller Disziplinen dar. Weitere Aspekte des Wassermanagements, die die aktive Sicherheit betreffen, sind beispielsweise die Verschmutzung von Front- und Heckleuchten, die Funktionsbeeinträchtigung von Sensoren und Kameras oder das Nassansprechverhalten der Bremsen. Überdies wird durch verschmutzte Fahrzeugoberflächen, wie Türgriffe oder Seitenwände, der Komfort eingeschränkt, da die Fahrgäste beim Einsteigen ihre Hände und/oder Kleidung verunreinigen könnten.

Trotz der fortlaufenden Forschung in den letzten Jahren sind einige (zentrale) Probleme noch immer ungeklärt. Dies liegt mitunter an der hohen Komplexität des realen Benetzungsprozesses mit Tropfen-Wand-Interaktionen, Tropfen-Tropfen-Interaktionen, Film- und Rinnsalbildung, Filmaufbruch, wandgebundenem Wassertransport, der Interaktion mit turbulenten Strömungen sowie dem Ablösen von Flüssigkeitsligamenten. Belastbare Untersuchungen zur Sichtfreihaltung werden heutzutage vor allem experimentell an Vorserienfahrzeugen und damit in einer späten Entwicklungsphase durchgeführt (vgl. Abbildung 1.1), weil numerische Berechnungen noch keine hinreichende Genauigkeit besitzen oder einen inakzeptablen Rechen- und Zeitaufwand benötigen. Numerische Modelle zur zuverlässigen Vorhersage der Fahrzeugbenetzung sind dringend erwünscht, um die Sichtfreihaltung bereits in der frühen Entwicklungsphase zu analysieren und gegebenenfalls Maßnahmen zur Verbesserung einzu-

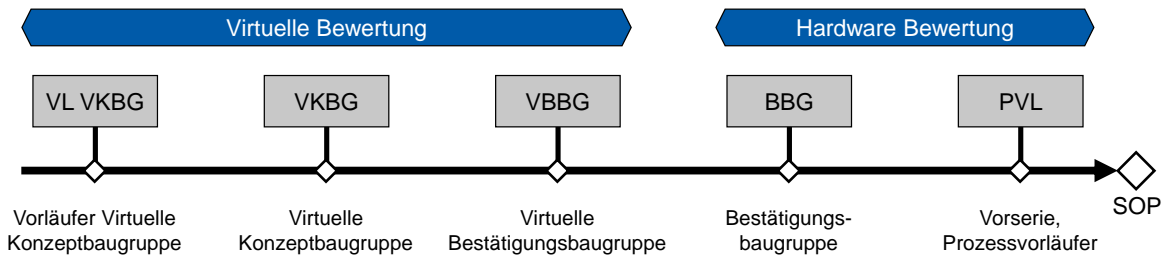


Abbildung 1.1: Bewertungsphasen der verschiedenen Entwicklungsstände und Potential der frühzeitigen, virtuellen Bewertung mithilfe von Simulationen

steuern, was mit zunehmendem Entwicklungsstand schwieriger wird und mit höheren Kosten verbunden ist. So steigen die Kosten zur Behebung eines Fehlers in jeder Entwicklungsstufe, die der Fehler unentdeckt durchläuft, gemäß der Zehnerregel der Fehlerkosten um den Faktor 10 an [125].

Nicht nur die erhöhte Modifikationsfreiheit in den frühen Phasen sondern auch verkürzte Entwicklungszyklen erfordern neben den bewährten Verfahren zur Auslegung und Beurteilung der Sichtfreihaltung im Umweltwindkanal, in dem reproduzierbare Versuchsbedingungen erzeugt werden, oder bei Straßenerprobungen, die jedoch eine regnerische Wetterlage voraussetzen, den Einsatz von virtuellen Verfahren. Dadurch könnte bereits zum ersten Prototypenstand eine geeignete Lösung für das Wasserfangkonzept vorliegen. Während das Vertrauen in numerische Simulationen von einphasigen Strömungsproblemen durch zahlreiche Validierungen gestützt wird und diese bereits frühzeitig im Entwicklungsprozess angewandt werden, fehlt es an Validierungen von komplexen Mehrphasensimulationen am Fahrzeug. Wie aus der Literaturrecherche zu experimentellen und numerischen Studien zur Sichtfreihaltung hervorgeht, existieren umfassende, experimentelle Methodiken zur Entwicklung und Bewertung der Seitenscheibenbenetzung, wohingegen qualitativ und quantitativ validierte Simulationen zur gesamtheitlichen Betrachtung der Sichtfreihaltung bisher nicht veröffentlicht wurden. Der Fokus liegt hierbei stattdessen auf der Simulation von Teilphänomenen wie z.B. dem Tropfenaufprall auf einer festen Wand oder dem Fließverhalten eines einzelnen Rinnsals.

Das Ziel dieser Arbeit ist, die numerische Strömungssimulation weiterzuentwickeln und ein Werkzeug zu schaffen, das die experimentseitige Entwicklung zum externen Wassermanagement unterstützt und eine frühzeitige Abschätzung der Sichtfreihaltung am virtuellen Fahrzeug ermöglicht. Dazu wird zunächst durch Grundlagenforschung an vom Fahrzeug abgeleiteten Versuchen das Fluidfilmmmodell bezüglich der Simulationsgüte untersucht. Die in weiteren Voruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse dienen als Basis zur Entwicklung einer mehrere Funktionalitäten vereinenden Methodik zur simulativen Abbildung der Scheibenwischerbewegung und Vorhersage der Scheibenbenetzung. Diese Methodik wird mit durchgeführten Experimenten an einem Personenkraftwagen verglichen und sowohl qualitativ als auch quantitativ validiert. Anschließend wird die gesamtheitliche Methodik hinsichtlich der Übertragbarkeit auf den klassischen Sichtfreihaltungsversuch im Umweltwindkanal überprüft und bewertet.

Die Fahrzeugverschmutzung, d. h. die Ansammlung von Fluid oder Verunreinigungen auf der Oberfläche eines Fahrzeugs, kann hinsichtlich der Entstehungsursache in

- Fremdverschmutzung und
- Eigenverschmutzung

untergliedert werden. Erstere Verschmutzungsart unterteilt sich in der Erweiterung des ursprünglichen Modells von POTTHOFF [128] durch HAGEMEIER [65, 66] zusätzlich in Fremdverschmutzung durch windgetriebenen Regen und durch von anderen Verkehrsteilnehmern hochgewirbelte Schmutz- und Flüssigkeitspartikel. Im Vergleich mit Regen haben die hochgeschleuderten Partikel einen um eine Größenordnung kleineren Tropfendurchmesser [66]. Die Eigenverschmutzung bezeichnet die durch das eigene Fahrzeug aufgewirbelte und auf die Oberfläche treffenden Schmutz- und Flüssigkeitspartikel. In erster Linie entsteht Eigenverschmutzung aufgrund der rotierenden Räder, weshalb die Radhäuser, die Seitenwände und das Fahrzeugheck am stärksten verschmutzt werden [139]. Eine weitere Quelle der Eigenverschmutzung stellen Reinigungsanlagen für Windschutzscheibe, Scheinwerfer, Kameras und Sensoren dar. Deren Reinigungsmedium kann von der Strömung mitgetragen werden und zu einer unerwünschten Benetzung auf Scheiben und Außenspiegeln führen.

Grundsätzlich trifft die Flüssigkeit in Form von Tropfen auf die Fahrzeugoberfläche. Auf der Oberfläche bewegt sie sich entweder als Einzeltropfen oder akkumuliert zu Rinnsalen und Filmen. Die Bewegung wird durch aerodynamische Kräfte, Gravitations- und Adhäsionskräfte sowie Oberflächenspannungen bestimmt. Da Regen eine der Hauptursachen für Fahrzeugverschmutzungsphänomene ist, wird anstatt Verschmutzung häufig von externem Wassermanagement (EWM – External Water Management) oder in Bezug auf die Durchsicht von Scheiben von Sichtfreihaltung gesprochen.

Ein Überblick zu verschiedenen Arbeiten im Bereich des externen Wassermanagements kann aus den Publikationen von ASHTON und BAAS [5], HAGEMEIER [65, 66], GAYLARD et al. [54] oder SPRUSS [150] gewonnen werden. Die nachfolgend aufgeführten Literaturstellen mit dem Fokus auf Sichtfreihaltung an Fahrzeugen werden in experimentelle Studien und numerische Simulationen unterteilt.

2.1 Experimentelle Studien zur Sichtfreihaltung

Die Hauptaufgabe experimenteller Untersuchungen war lange Zeit die Generierung realer Fahr- und Regenzustände. Durch ständige Verbesserung der Hardware können die Zustände auf der Straße mehr und mehr angenähert werden. Die nachgestellte Regenfahrt wird seitdem in speziell dafür gebauten Windkanälen durchgeführt. Durch die reproduzierbaren Bedingungen im Windkanal können Straßenversuche substituiert werden. Ein Windkanal ist witterungsunabhängig und bietet Schutz für Prototypen. Weiterhin können Eigen- und Fremdverschmutzung separat voneinander analysiert werden. Weitere Ziele der experimentellen Untersuchungen sind die Optimierung der Sichtfreihaltung oder die Generierung bzw. Weiterentwicklung numerischer Modelle. Nachfolgend werden ausgewählte Studien zum externen Wassermanagement aufgezeigt.

Die ersten Veröffentlichungen zur Fahrzeugverschmutzung stammen aus den siebziger Jahren von GÖTZ [62] und POTTHOFF [128]. GÖTZ [62] beschreibt den Einfluss von Designelementen auf die Fahrperformance und die Sicherheit sowie Vorkehrungen zur Reduktion der Oberflächenablagerung an vollmaßstäblichen und skalierten Fahrzeugmodellen im Windkanal der DAIMLER-BENZ AG. POTTHOFF [128] führte Untersuchungen an 1:1-Fahrzeugmodellen in einem speziellen Windkanal durch. Die Verschmutzungsphänomene am Fahrzeug werden durch Hinzugabe von Kreide oder Farbpulver sichtbar gemacht und festgehalten. In den anschließenden Jahren führen Automobilhersteller vermehrt Experimente in eigenen Windkanälen durch.

Heutzutage erfolgt die Sichtbarmachung der Benetzung durch Beimischung einer geringen Menge eines Fluoreszenzagenten, der unter UV-Bestrahlung elektromagnetisch angeregt wird und beim Wiedereinnehmen des niedrigeren Energieniveaus ein Photon abgibt. Das Fluoreszenzagent-Wasser-Gemisch leuchtet dabei typischerweise bläulich, wodurch im abgedunkelten Umweltwindkanal eine deutliche Differenzierung zwischen benetzten und unbenetzten Stellen ermöglicht wird. Dies kann mit Kameras aufgenommen und im Postprocessing mittels Bildbearbeitung ausgewertet werden. Die Vorteile gegenüber der Sichtbarmachung durch Kreide liegen zum einen im reduzierten Reinigungsaufwand nach einem durchgeführten Versuch und zum anderen wird die exemplarisch in [128, 167] aufgeführte Abrasion durch Feststoffpartikel der Kreide an Fahrzeug und Windkanal vermieden. Publikationen zur Aerodynamikentwicklung neuer Fahrzeugmodelle wie beispielsweise [52, 141, 168] weisen teils einen Abschnitt zur Verbesserung der Sichtfreihaltung auf. Darin werden meist Benetzungsbilder vor und nach der umgesetzten Maßnahme gegenübergestellt. Die Fluoreszenzmethode findet ebenfalls bei der Entwicklung von Nutzfahrzeugen Anwendung [89].

Neben dem qualitativen Vergleich lassen sich aus den unter Fluoreszenz aufgenommenen Benetzungsbildern mit Hilfe von Techniken zur Bildverarbeitung quantitative Größen bestimmen. Zur Analyse von Verschmutzungsphänomenen ist am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren in Stuttgart die Software DiVEAN entstanden [167]. Das aufgenommene Bild- und Videomaterial wird hinsichtlich der Intensität eines einzelnen Farbkanals ausgewertet. Da das Fluoreszenzmittel meist blaues Licht emittiert, wird der blaue Farbkanal genutzt. Zur Bewertung der Verschmutzung werden zwei Kenngrößen eingeführt. Der Kontaminationsfaktor K_F repräsentiert die durchschnittliche Leuchtintensität einer untersuchten Region. Er

berechnet sich über Gl. (2.1) durch Summation der Intensitäten aller Bildpunkte und Division mit der Gesamtanzahl N_P der Pixel im relevanten Bereich. Der Kontaminationsfaktor wird durch die Intensität des Anregungslichtes und den Anteil des beigemischten Fluoreszenzmittels beeinflusst.

$$K_F = \frac{\sum_{n=1}^{N_P} I(n)}{N_P} \quad (2.1)$$

Die zweite Kenngröße ist der Verschmutzungsgrad oder allgemeiner Benetzungsgrad B_G . Dieser Wert beschreibt den Anteil der benetzten Fläche einer untersuchten Region. Er wird gemäß Gl. (2.2) bestimmt, wobei im Zähler nur die Pixel gezählt werden, deren Intensität einen vorgegebenen Grenzwert I_{GW} übersteigt.

$$B_G = \frac{\sum_{n=1}^{N_P} (I(n) > I_{GW})}{N_P} \quad (2.2)$$

Weiterentwicklungen zur quantitativen Benetzungsanalyse werden in [2, 150, 162, 163] aufgezeigt. Hier sei insbesondere die „Methode der opaken Schicht“ von VOLLMER [162] erwähnt, die selbst ohne Beimischung von Tracern angewendet werden kann. Dies ermöglicht die Auswertung der Benetzung bei einer realen Straßenfahrt während natürlichem Regen. Beim Vergleich zwischen Messungen im Umweltwindkanal und den realen Regenfahrten sind gleiche Benetzungsphänomene erkennbar. Im Fall der Straßenfahrt liegt zusätzlich eine direkte Benetzung der Seitenscheibe mit großen Regentropfen vor, die im Windkanal aufgrund der geringeren Tropfengröße und des Wassereintrags mit der Luftströmung nicht entsteht. Da diese Verschmutzungsart weder durch Form- noch durch Eigenschaftsänderungen am Fahrzeug beeinflusst werden kann, wird sie bei der Auslegung üblicherweise nicht näher untersucht.

BOUCHET et al. [22] führen eine experimentelle Studie mit unterschiedlichen Regenintensitäten im Klimawindkanal JULES VERNE durch. Der Fokus liegt hierbei in der Abbildung realistischer Regenbedingungen, die aus meteorologischen Datensätzen bekannt sind. Dazu entwickelten sie ein Verfahren, das die Regenintensität im Kanal misst und kalibriert. Die alleinige Einstellung des zugeführten Wassermassenstroms ist unzureichend, da je nach Tropfendurchmesser- und -trajektorien der Wassereintrag auf der Fahrzeugoberfläche unterschiedlich ausfallen kann. Auch [58] handelt von der Entwicklung eines Windkanals mit realistischen Regenbedingungen, in dem Windgeschwindigkeiten bis 50 km h^{-1} , diverse Regenintensitäten, Fahrzustände und Temperaturbereiche nachgestellt werden können. Dazu werden Hardwarekomponenten des Windkanals mittels numerischen Simulationen ausgelegt und die Auslegung durch Experimente validiert.

Zur Optimierung der Sichtfreihaltung werden in den meisten Veröffentlichungen geometrische Stellhebel wie Wasserfang- und -führungskonzepte entlang der A-Säule oder Leitelemente an Außenspiegel oder Spiegelfuß empfohlen. So wird beispielsweise in [11] die Beeinflussung durch verschiedene Außenspiegelgeometrien und in [51] durch die Geometrievariation der A-Säule untersucht. HÖFER und MÖSSNER [74] liefern diesbezüglich einen Überblick und führen zusätzlich den Einfluss durch die Oberflächenbeschaffenheit auf. Durch Aufbringen von Substanzen lässt sich die Scheibe hydrophobieren. Dadurch wird die Haftung von Regentropfen auf der Scheibe vermindert und große Benetzungsstellen platzen in kleinere Tropfen auf, die eine größere Dicke aufweisen und schneller mit der Luftströmung über die Scheibe bewegt werden. Mit dieser Maßnahme wird die Benetzung reduziert und die Durchsicht verbessert.

Eine Hydrophobierung der Windschutzscheibe wird trotz der Verbesserung der Durchsicht an Serienfahrzeugen nicht angewendet, da der fehlerfreie Betrieb der Scheibenwischer dabei nicht gewährleistet werden kann. Es könnte zu Scheibenwischerrattern mit negativen Effekten auf die Reinigung und die Akustik kommen, da für ein sauberes Gleiten der Scheibenwischer über die Scheibe ein dünner Wasserfilm zwischen Gummilippe und Glasscheibe benötigt wird [7]. Eine hydrophob beschichtete Seitenscheibe ist hingegen empfehlenswert für die Sichtfreihaltung und wird bereits bei ausgewählten Serienfahrzeugen – beispielsweise seit 2004 bei PORSCHE [25, 168] – verbaut. VOLLMER [162] untersucht den Einfluss des Kontaktwinkels auf den Abfließwinkel und die Filmhöhe eines einzelnen Rinnsals sowie auf die Seitenscheibenverschmutzung anhand von Grundlagen- und Fahrzeugversuchen im Umweltwindkanal.

Inwiefern die verschiedenen Benetzungsregime wie Tropfen oder Rinnsale die Durchsicht behindern, untersuchen LANDWEHR et al. [96] in einer Probandenstudie. Die Probanden bewerten zunächst die Sicht durch eine mit Tropfen benetzte Glasscheibe auf ein regelmäßiges Gitter. In der nächsten Stufe wird das regelmäßige Gitter durch Landoltringe (Normzeichen bei Sehtests) ersetzt. Für verschiedene Tropfenvolumen und Kontaktwinkel wird die Sichtbarkeit der Position der Landoltringöffnung untersucht. Die Studie ergab, dass die beste Durchsicht bei kleinen Tropfenvolumen und hohen Kontaktwinkeln erreicht wird. In [95] stellt LANDWEHR heraus, dass neben dem Fahrer selbst der entscheidende Parameter in Bezug auf die Sichtbeeinträchtigung durch benetzte Scheiben die benetzte Fläche ist, die Filmhöhe sei weniger relevant. Der Kontaminationsfaktor ist demnach keine geeignete Größe zur Auswertung der Sichtbeeinträchtigung.

Zur Erhöhung des Verständnisses der relevanten Einflussfaktoren hinsichtlich der Benetzungsmuster auf einem Fahrzeug ist an der TU Darmstadt ein Forschungsverbund zum EWM entstanden. Im Rahmen dieses Forschungsverbunds, in den die vorliegende Arbeit integriert ist, werden experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt. SEILER [142] analysiert den Bewegungsbeginn eines auf einer Oberfläche haftenden Einzeltropfens in einem Windkanal mit optisch zugänglicher, horizontaler Messstrecke. Die Bewegung des Tropfens auf der Oberfläche resultiert dabei aus den angreifenden, aerodynamischen Kräften. Aus den Experimenten leitete er Modelle zur Tropfenausbreitung auf Oberflächen ab. Zudem generierte SEILER experimentelle Daten zum Verhalten von Rinnsalen, die zur Validierung von physikalischen und empirischen Modellen sowie Simulationen genutzt werden können. FELDMANN [49] fokussiert sich im Gegensatz zu SEILER auf größere Wasservolumenströme. So untersucht er das Verhalten von dünnen, flächigen Filmen auf Oberflächen und den Aufbruch des Films in Rinnsale und stellt entsprechende Modelle auf. Die experimentellen Ergebnisse zum Filmaufbruch werden in Abschnitt 5.2 der vorliegenden Arbeit aufgegriffen, um durchgeführte, numerische Simulationen mit dem Fluidfilmmodell anhand von qualitativen und quantitativen Größen zu validieren. Die entwickelten Modelle der Mitglieder des Forschungsverbunds sind aus Beobachtungen von stark vereinfachten Grundlagenversuchen entstanden, da hierbei Einflussfaktoren auf die Benetzung isoliert voneinander und unter bekannten Randbedingungen betrachtet werden können. Ihre Übertragbarkeit auf die Situation am Gesamtfahrzeug ist zu prüfen.

2.2 Numerische Simulationen zur Sichtfreihaltung

Gerade aufgrund zunehmender Rechenleistung und verkürzter Entwicklungszeiten gewinnen numerische Simulationen zur Entwicklung neuer Automobile an Bedeutung, da sie nicht auf die Existenz von physischen Prototypen angewiesen sind und einen detaillierten Einblick in das Strömungsfeld gewähren. Numerische Simulationen können bereits in frühen Entwicklungsphasen eingesetzt werden. In der Literatur werden dazu neben den auf RANS-Gleichungen basierenden Modellen zusätzlich detailliertere Ansätze wie die LES oder DES eingesetzt. Zudem finden sich Simulationen, die mit der Lattice-Boltzmann-Methode berechnet werden. Während CFD-Berechnungen für die einphasige Fahrzeugum- und -durchströmung bereits ein etabliertes Entwicklungswerkzeug sind, dessen Ergebnisse durch zahlreiche Validierungen (v. a. im Bereich der Aerodynamik und Aeroakustik) gestützt werden, existieren bisher nur wenige Validierungen von Mehrphasensimulationen zum EWM am Gesamtfahrzeug, die neben einem qualitativen Vergleich auch quantitativen Größen berücksichtigen.

Um den komplexen Prozess der Berechnung von Fahrzeugverschmutzungen beherrschbar zu machen, wird von KARBON und LONGMAN [86] eine dreistufige Vorgehensweise vorgeschlagen, die später von FOUCART und BLAIN [51] differenziert wird:

1. Berechnung des aerodynamischen Strömungsfeldes um das Fahrzeug
2. Einbringung und Verfolgung von Tropfen
3. Tropfenaufprall und Filmmodellierung auf der Oberfläche (sowie Ablösung von Ligamenten)

Sofern die Schritte miteinander gekoppelt sind, können sie nicht hintereinander ausgeführt werden. Lediglich der erste Schritt kann unabhängig von den anderen ausgeführt werden, um eine geeignete Startlösung zu generieren. Dennoch werden die Schritte in der Literatur oftmals sequenziell ausgeführt, um Rechenaufwand einzusparen bei gleichzeitiger Akzeptanz von größeren Fehlern [65].

Der Wassereintrag in die Simulationsregion findet üblicherweise in Form von Tropfen statt. Zur Abbildung der dispersen Phase wird ein Euler-Lagrange-Ansatz verwendet. Die kontinuierliche Luftphase wird über die Navier-Stokes-Gleichungen in der ortsfesten, eulerschen Betrachtungsweise berechnet und die disperse Flüssigkeitsphase über gewöhnliche Differentialgleichungen in der mitbewegten, lagrangeschen Betrachtungsweise. Details hierzu sind in Abschnitt 4.4.1 aufgeführt. In der Literatur wird meist die einfachste Kopplungsvariante – die Einwegekopplung – angewandt, da sie für Untersuchung zur Fahrzeugverschmutzung ausreichend genau ist. Die Eignung von Lagrange-Simulationen für Untersuchungen zur Fahrzeugeigenverschmutzung werden in [56, 172] festgehalten. Im Fokus der Untersuchung liegt die Eigenverschmutzung der Fahrzeugseiten und des -hecks. Experimentell ermittelte Tropfenspektren entlang des Umfangs eines auf einem Wasserfilm drehenden Rades dienen bei SPRUSS et al. [151] als Eingangsgrößen für die Simulation des Absprühverhaltens eines freistehenden Rades. Der Abgleich mit Messdaten weist eine hohe qualitative Übereinstimmung auf. In [85] werden verschiedene Spray-Modelle am Reifen eines generischen Vollheckfahrzeugs simulativ untersucht. Zudem wird gezeigt, dass der Großteil der Heckbasisverschmutzung ihren Ursprung in einem kleinen Bereich nahe des Reifenlatsches hat.

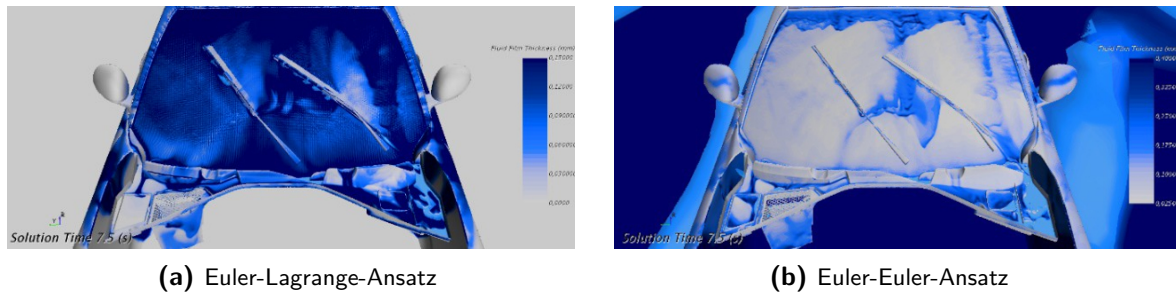


Abbildung 2.1: Gegenüberstellung der beiden numerischen Ansätze zur Simulation der Fahrzeugberegnung (nach [108])

Neben dem Euler-Lagrange-Ansatz existiert ein weniger rechenintensiver Euler-Euler-Ansatz zur Simulation eines Regenzustands (Disperse Mehrphasen). In [108] werden die beiden Ansätze für den Fall der Beregnung eines Fahrzeugs bei Berücksichtigung der Scheibenwischerbewegung gegenübergestellt. Die instationäre Berechnung erfolgt in Kooperation mit ALFA ROMEO in der Software STAR-CCM+ unter Verwendung des realizable k - ε -Turbulenzmodells. Für den Regen wird beim Euler-Lagrange-Ansatz ein Wassermassenstrom von $0,2 \text{ kg s}^{-1}$ und ein Partikeldurchmesser von $0,5 \text{ mm}$ angenommen. Beim Euler-Euler-Ansatz der dispersen Mehrphasensimulation wird lediglich der Volumenanteil des Regens mit $0,005$ vorgegeben. In Abbildung 2.1 sind Momentaufnahmen der beiden Ansätze gegenübergestellt, bei denen die Filmhöhe ausgewertet wird. Die Berechnung mit dem aufwendigeren Euler-Lagrange-Ansatz liefert laut den Autoren realistischere Ergebnisse. Ein wesentlicher Nachteil der dispersen Mehrphasensimulation mit dem Euler-Euler-Ansatz ist das Vorhandensein einer gewissen Wassermenge in nahezu jedem Bereich der Simulationsdomain, selbst dort, wo eigentlich kein Wasser hinkommen sollte (siehe Abbildung 2.1b). Abgesehen vom Tropfenaufprall auf der Fahrzeugoberfläche wird die Wasserablösung an Wellen und Kanten sowie die Wassermenge in kritischen Bereichen der Klimatisierungsanlage untersucht. Beim Abgleich der Wassermengen zwischen Experiment und Simulation werden erhebliche Unterschiede festgestellt und potentielle Mängel in den durchgeführten Simulationen aufgezeigt. [108]

Die Partikelbahnen und -auftreffpunkte auf der Oberfläche sind mit Euler-Lagrange-Simulationen in guter Näherung berechenbar. Soll jedoch daran angrenzend die Benetzung der Fahrzeugoberfläche simuliert werden, werden die Anforderungen schnell komplex. Einige Veröffentlichungen zeigen die Grenzen und Optimierungspotentiale der verwendeten Modelle auf, andere Publikationen reduzieren die Anzahl der Einflussparameter weitestgehend und nutzen zudem eine stark vereinfachte Geometrie für Grunduntersuchungen. Typische Studien sind beispielsweise der Tropfenaufprall [8, 10], das Fließverhalten von Flüssigkeiten auf ebenen Platten [63, 75] oder das Ablösen von Ligamenten [30, 112]. Für Sichtfreihaltungssimulationen werden in der Literatur meist Filmmodelle verwendet (z. B. in [55, 80]). Diese basieren auf dem für innermotorische Vorgänge entwickelten Modell von O'ROURKE und AMSDEN [121], das mit den Jahren kontinuierlich erweitert wurde. Eine nennenswerte Erweiterung bildet die von MEREDITH et al. [114, 115] beschriebene Berücksichtigung der Oberflächenspannung. Das Filmmodell ist generell nur unter gewissen Voraussetzungen gültig, da bei der Herleitung einige Vereinfachungen und Annahmen getroffen werden. Es liefert Werte für die Filmhöhe

sowie die mittleren Filmgeschwindigkeiten tangential zur Oberfläche. In Abschnitt 4.4.2 wird das Filmmodell detailliert beschrieben. Mit der aktuellen Version des Filmmodells lassen sich für einfache Geometrien sehr gute Ergebnisse erzielen (vgl. [37, 38] und Abschnitt 5.2).

An komplexeren Geometrien sind Filmmodelle jedoch nur mit Einschränkungen einsetzbar. Bei Personenkraftwagen kann es gerade im Bereich der A-Säule mit Wasserfangleisten, Zierleisten und Dichtungen zum Aufdicken der Flüssigkeit oder Ablösen von Ligamenten kommen, was mit dem reinen Filmmodell nicht darstellbar ist. Zahlreiche Veröffentlichungen versuchen die Einschränkungen des Filmmodells durch Modellerweiterungen zu reduzieren. BORG und VEVANG [21] untersuchen den Einfluss des Außenspiegeldesigns auf die Seitenscheibenbenetzung. Dazu modellieren sie die Tropfen-Wand-Interaktion und stellen den Übergang zum Filmmodell her. Das Ablösen von Tropfen aufgrund von Instabilitäten des Fluidfilms wird von CAMPOS et al. [30] mit einem Modell beschrieben.

GAYLARD et al. [55] und JILESEN et al. [80] modellieren den A-Säulenüberlauf bei definierter Aufbringung eines Rinnals unter Verwendung des Lattice-Boltzmann-Lösers POWERFLOW. Die Untersuchungen werden in Zusammenarbeit mit JAGUAR LAND ROVER durchgeführt und mit Windkanalmessungen am FKFS verglichen. Für die Strömungsgeschwindigkeiten von 80 km h^{-1} und 100 km h^{-1} wird der grundsätzliche Trend des Rinnsalfließverhaltens bei gezielter Wasserinjektion nahe der A-Säule mit einem Volumenstrom von $0,07 \text{ l min}^{-1}$ vorhergesagt, wobei die Simulation laut den Autoren sehr sensitiv auf kleine Änderungen in der Luftströmung oder der Filmhöhe sowie auf die Variation der Wassereintrittsposition reagiert. Die Rinnsaltrajektorie ergibt sich aus dem Gleichgewicht zwischen Schub- und Gravitationskräften. Beide Arbeiten identifizieren Bereiche mit weiterem Verbesserungspotential und heben die Bedeutung von Validierungen der CFD-Methoden hervor.

Die Sichtfreihaltung eines Busses wird in [33] untersucht. Darin werden Straßentests von PREVOST, einer Tochtergesellschaft von VOLVO, und Simulationen mit dem in die Lattice-Boltzmann-Methode integrierten Lagrange-Partikel-Film-Löser durch den Softwarehersteller EXA (mittlerweile DASSAULT SYSTÈMES) verglichen. Bei den Straßentests fahren zwei Busse mit einer Geschwindigkeit von 100 km h^{-1} und einem Abstand von ungefähr 24 m hintereinander. Während der vordere Bus als Referenz und zur Aufwirbelung von Schmutz- und Flüssigkeitspartikeln dient, wird am hinterherfahrenden Bus die ankommende Verschmutzung auf den Scheiben erfasst. Die Variation des Fahrzeugabstands und die Temperatur zu den Testzeiten zeigen keinen signifikanten Einfluss auf die Verschmutzungsbilder. Da die exakten Testbedingungen unbekannt sind, wird in der Simulation starker Regen mit einer Intensität von 17 mm h^{-1} angenommen. Trotz der Unsicherheiten in den Randbedingungen zeigen Simulation und Experiment qualitativ vergleichbare Phänomene, wie einen Wasserpool in der oberen Ecke der Seitenscheibe und vom Außenspiegel abtropfendes Spray.

In der Arbeit von KARBON und LONGMAN [86] wird die numerische Strömungssimulation in der Automobilindustrie als Komplement zu Windkanalexperimenten eingesetzt, um die Bewegung des Wassers auf dem Fahrzeugexterieur bei Regen zu bewerten. Dazu wird ein abgestufter Euler-Lagrange-Ansatz zur Berechnung verwendet. Die Simulationsregion ist auf einen kleinen Ausschnitt von der vorderen Seitenscheibe, der A-Säule und dem Außenspiegel

beschränkt und das Strömungsfeld wird vorgegeben. Die Berechnungen zeigen ähnliche Tendenzen wie Untersuchungen im Windkanal, woraus abgeleitet wird, dass Simulationen zum Wasserverhalten auf Fahrzeugoberflächen durchaus Potentiale bieten.

Eine weitere, verbreitete Methode zur Bestimmung einer zweiten Phase ist die von HIRT und NICHOLS [73] eingeführte Volume-of-Fluid-Methode. Im Gegensatz zu Filmmodellen lassen sich damit freie Oberflächen darstellen. Die Methode eignet sich für Berechnungen von zwei nicht mischbaren Phasen in einem Rechengebiet. Pro Zelle wird der Volumenanteil der zweiten Phase bestimmt, woraus sich die Phasengrenze im Gebiet ableiten lässt. In Abschnitt 4.4.3 können Details nachgelesen werden. Motiviert durch den Bedarf an präzisen Simulationen zum EWM koppeln DIANAT et al. [44] die VOF-Methode mit einem Level-Set-Verfahren und validieren die resultierende Coupled-Level-Set-Volume-of-Fluid-Methode anhand eines Tropfenaufpralls. Aufgrund der hohen Anforderungen an die räumliche und zeitliche Auflösung ist die VOF-Methode sehr rechenzeitintensiv, was die Möglichkeiten der Sichtfreihaltungssimulation an Fahrzeugen stark begrenzt. Dies begründet, weshalb eine reine VOF-Simulation an einer komplexen Fahrzeuggeometrie bisher nicht in der Literatur zu finden ist. Zur Reduktion der Rechenzeit wird in der hier vorliegenden Arbeit ein hybrider Ansatz aufgezeigt, der das Filmmodell mit der Volume-of-Fluid-Methode kombiniert (siehe Abschnitt 4.4.4).

Ein vielversprechendes Verfahren, das in einer eigens durchgeführten Studie zum aktuellen Stand der jeweiligen Softwarepakete für die Simulationsaufgabe anhand von PREONLAB getestet wurde, ist die Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Sie ist ein sehr effizienter, gitterloser Ansatz zur Fluidodynamik und wurde von GINGOLD und MONAGHAN [60] entwickelt. Das Fluid wird hierbei durch Partikel diskretisiert, die sich frei im Raum bewegen können. Aus den Partikelinteraktionen lässt sich das globale Fluidverhalten bestimmen. Die Luftphase wird nicht explizit berechnet, sondern über ein Modell oder eingeladene Tabellen vorgegeben. Dadurch ist lediglich eine einseitige Kopplung von der Luftströmung auf das Fluid möglich. Haupteinsatzgebiete an Fahrzeugen sind Simulationen zum Abfließverhalten von Wasser oder zur Wasserdurchfahrt (siehe z. B. [123]). Eine Bewegung von Geometrien ist mit diesem Verfahren verhältnismäßig einfach realisierbar. Dies ermöglicht mit gewissen Einschränkungen die Simulation von Scheibenwischerbewegungen, wobei auch hier der Fokus auf dem Abfließen durch den Motorraum liegt.

Die numerischen Untersuchungen des Forschungsverbunds zum EWM an der TU Darmstadt sind neben der vorliegenden Arbeit die Arbeiten von RETTENMAIER [130] und ADE [1]. RETTENMAIER [130] berechnet die detaillierte Bewegung eines einzelnen Tropfens in Scherströmung mit der Volume-of-Fluid-Methode in der Open-Source-Software OPENFOAM. Dazu koppelt er eine Vielzahl von Oberflächenspannungs- und Kontaktwinkelmodellen, um die Bewegung möglichst akkurat abzubilden. Darüber hinaus verbessert RETTENMAIER die dynamische Lastverteilung sowie die adaptive Netzverfeinerung in der Simulationssoftware und führt Simulationen zu einzelnen Rinnsalen durch. Aufgrund des enormen Rechenaufwands sind solch detaillierte Simulationen nur in sehr kleinen Simulationsregionen möglich. ADE [1] beschäftigt sich mit dem Tropfenaufprall auf eine Halbkugel in einem vertikalen Modellwindkanal. Der Grundlagenversuch ähnelt dem Tropfenaufprall auf einen Außenspiegel und dient der Einstellung von Parametern des in STAR-CCM+ vorliegenden Tropfenaufprallmodells. Neben dem deponierten Wasseranteil werden Primär- und Sekundärtropfen analysiert. In Kooperation

mit SIEMENS wird ein Modell entwickelt, das die aerodynamische Formwiderstandskraft auf Rinnsale im zweidimensionalen Fluidfilmmodell berücksichtigt. In einer Gegenüberstellung von Experimenten mit Punktinjektor und Simulationen wird die Wirkung des Modells aufgezeigt. Überdies wird der Bezug zum externen Wassermanagement an Fahrzeugen hergestellt.

Trotz der Fortschritte in den vergangenen Jahren sind verlässliche, quantitative Vorhersagen von Benetzungsmustern zur Sichtfreihaltung nach wie vor eine offene Forschungsfrage, insbesondere wenn komplexe Geometrien betrachtet oder Phänomene wie Filmaufbruch in Rinnsale untersucht werden. Die meisten Studien beruhen deshalb fast ausschließlich auf einem qualitativen Vergleich. Darüber hinaus fehlt es an Berechnungen des komplexen Wasserübergangs an der A-Säule. Simulative Untersuchungen zur Sichtfreihaltung der Seitenscheibe werden daher weitestgehend in einer reduzierten Simulationsdomain durch direkten Wassereintrag auf der Seitenscheibe umgesetzt. In Bezug auf die Simulation der Sichtfreihaltung der Frontscheibe wird die Scheibenwischergeometrie zudem oft stark vereinfacht dargestellt oder sogar komplett durch einen Impulseintrag substituiert, um den Aufwand zur Berechnung der Netzbewegung zu verringern. Da die reale Scheibenwischergeometrie die lokale und – wie in Abschnitt 6.3 gezeigt – sogar die globale Umströmung beeinflusst, könnten Effekte aufgrund der Strömungsbeeinflussung bei einer solchen Simulation unberücksichtigt bleiben.

In diesem Kapitel werden Grundlagen zur Fahrzeugaerodynamik und der Benetzung von Oberflächen vorgestellt. Dazu werden die aerodynamischen Beiwerte sowie Kenngrößen von Mehrphasenströmungen beschrieben und Begrifflichkeiten zur Benetzung definiert. Des Weiteren wird der Wasserpfad entlang eines Fahrzeugs während einer Regenfahrt skizziert.

3.1 Fahrzeugkoordinatensystem

Zur eindeutigen Referenzierung und zur Gewährleistung einer vergleichbaren Auswertung sind einheitlich definierte Koordinatensysteme vonnöten. Das kartesische Standard-Koordinatensystem liegt im Mittelschnitt des Fahrzeugs auf Höhe der vorderen Radnabe. Die x -Achse zeigt entgegen der Fahrtrichtung in Fahrzeuglängsrichtung und die z -Achse in Fahrzeughochrichtung

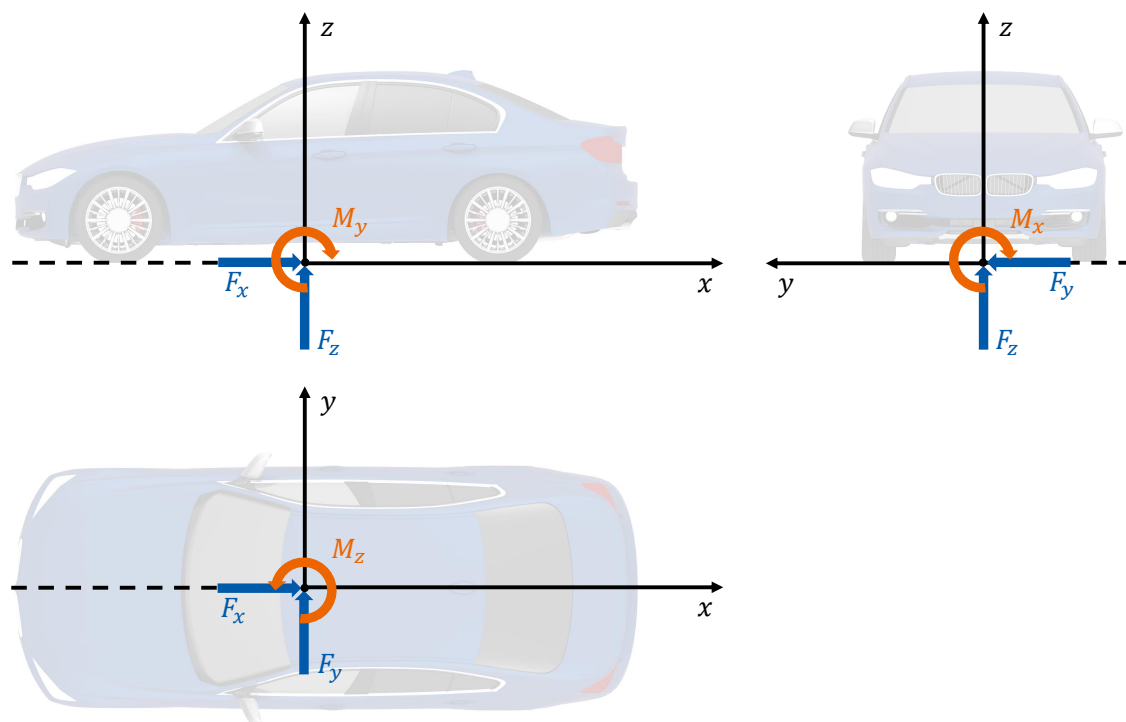


Abbildung 3.1: Fahrzeugfestes Koordinatensystem mit den am Fahrzeug angreifenden Kräften und Momenten (in Anlehnung an [140])

nach oben. Zur Einhaltung des Rechtssystem ist die verbleibende y -Achse in Fahrzeugquer-
richtung nach rechts orientiert. [133] Auf dieses Koordinatensystem werden alle weiteren
Koordinatensysteme direkt bzw. indirekt über andere Systeme referenziert.

Ein für die Aerodynamik weitaus wichtigeres Koordinatensystem befindet sich in der Fahr-
bahnebene im Schwerpunkt des durch die vier Radaufstandspunkte aufgespannten Trapezes.
Es ist fahrzeugfest und hat die gleiche Orientierung wie das Standard-Koordinatensystem.
Die am Fahrzeug angreifenden Kräfte und Momente werden in Bezug auf dieses Koordina-
tensystem angegeben [140]. In Abbildung 3.1 ist das Koordinatensystem inklusive der am
Fahrzeug angreifenden Kräfte (blau) und Momente (orange) dargestellt. Dabei sind F_x, F_y
und F_z die Widerstands-, Seiten- und Auftriebskraft und M_x, M_y und M_z das Wank-, Nick-
und Giermoment.

Grundsätzlich können die bestimmten Kräfte und Momente auf jeden beliebigen Punkt
umgerechnet oder aufgeteilt werden, um beispielsweise deren Einfluss auf die jeweiligen Fahr-
zeugachsen zu erhalten. Die Luftkräfte F_i , die sich aus der Fahrzeugum- und -durchströmung
ergeben, setzen sich aus einem Druck- und einem Reibungsanteil zusammen. Sie können durch
Addition der beiden Flächenintegrale für den Druck p und die gerichtete Wandschubspan-
nung $\tau_{w,i}$ gemäß Gl. (3.1) bestimmt werden. Die (Versatz-)Momente M_i entstehen durch
Verschiebung der Luftkräfte in den Ursprung des zuvor eingeführten Fahrzeugkoordinatensys-
tems. [140]

$$F_i = - \int p n_i dA + \int \tau_{w,i} dA \quad \text{mit } i = \{x, y, z\} \quad (3.1)$$

3.2 Aerodynamische Beiwerte

Aus Gründen der Vergleichbarkeit von Versuchen untereinander und der Übertragbarkeit
von Modellversuchen werden dimensionsbehaftete Größen wie Kräfte, Momente oder Drücke
üblicherweise in Form von dimensionslosen Beiwerten angegeben. Dazu werden die Größen
entdimensioniert, wobei die versuchsspezifische Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit,
der Fluidichte und der Größe des Modells eliminiert wird [71]. Die Druckgrößen werden mit
dem dynamischen Druck der Anströmung

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho u_\infty^2 \quad (3.2)$$

normiert. Hierbei ist ρ die Fluidichte und u_∞ die ungestörte Geschwindigkeit der Anströ-
mung. Damit wird der dimensionslose Druckbeiwert wie folgt definiert, wobei im Zähler
die Druckdifferenz aus statischem Druck p_s und dem Referenzdruck p_∞ und im Nenner der
dynamische Druck q_∞ steht.

$$c_p = \frac{p_s - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2} \quad (3.3)$$

Im Staupunkt nimmt der Druckbeiwert sein Maximum an. Dort gilt $c_p = 1$, während der c_p -Wert für allgemeine Fahrzeugumströmungen Werte von -2 bis 1 annimmt [140]. Der dimensionslose Totaldruckbeiwert wird analog bestimmt. Anstatt des statischen Drucks p_s wird der totale Druck $p_t = p_s + \frac{1}{2} \rho u^2$ verwendet.

Für die Entdimensionierung der Kräfte wird neben dem dynamischen Druck q_∞ die in x -Richtung projizierte Stirnfläche des Fahrzeugs A_x benötigt. Damit ergibt sich die nachfolgende Berechnungsvorschrift für die Kraftbeiwerte c_i :

$$c_i = \frac{F_i}{\frac{1}{2} \rho A_x u_\infty^2} \quad \text{mit } i = \{x, y, z\} \quad (3.4)$$

Als Bezugspunkt für Kräfte und Momente wird der in Fahrbahnebene liegende Schwerpunkt des durch die Radaufstandspunkte aufgespannten Trapezes verwendet [139]. In diesem Punkt liegt auch das in Abschnitt 3.1 beschriebene Koordinatensystem.

3.3 Kenngrößen von Mehrphasenströmungen

Zur Steigerung der Vergleichbarkeit verschiedener Untersuchungen werden dimensionslose Kenngrößen verwendet. Diese lassen sich mittels einer Dimensionsanalyse (siehe buckingham'sches π -Theorem [28]) aus den relevanten Größen des jeweiligen Problems herleiten. Nachfolgend werden für diese Arbeit relevante Kennzahlen zu Mehrphasenströmungen vorgestellt.

Weberzahl

Die Weberzahl We gibt das Verhältnis zwischen Trägheitskraft und stabilisierender Oberflächenkraft an (vgl. Gl. (3.5)) und ist ein Maß für die Neigung eines Tropfens zur Verformung bzw. zum Zerfall. Ein Tropfen mit großer Weberzahl (v. a. aufgrund großer Relativgeschwindigkeiten oder Durchmesser) droht eher zu zerfallen als einer mit niedriger Weberzahl. Folglich sind Regentropfen mit Durchmessern größer als vier Millimeter eher selten [31]. PILCH und ERDMANN [126] kategorisieren die verschiedenen Zerfallsmechanismen von Tropfen in Abhängigkeit der Weberzahl. In Gl. (3.5) ist die Berechnungsformel für die Weberzahl dargestellt, wobei ρ die Dichte, u_{rel} die relative Strömungsgeschwindigkeit zwischen Tropfen und umgebenem Fluid, σ die Oberflächenspannung und L eine charakteristische Länge (z. B. der Tropfendurchmesser) ist. [34]

$$We = \frac{\rho u_{\text{rel}}^2 L}{\sigma} \quad (3.5)$$

Reynoldszahl

Die Reynoldszahl Re ist eine dimensionslose Kennzahl, die das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften beschreibt. Sie berechnet sich über Gl. (3.6), wobei u die Strömungsgeschwindigkeit, L ein charakteristisches Längenmaß und ν die kinematische Viskosität ist.

$$Re = \frac{u L}{\nu} \quad (3.6)$$

Die Reynoldszahl wird zudem zur Charakterisierung verschiedener Strömungstypen genutzt. Laminare Strömungen treten bei kleinen Reynoldszahlen und turbulente Strömungen bei großen Reynoldszahlen auf. Bei Überschreiten einer kritischen Reynoldszahl Re_{krit} , die vom betrachteten strömungsmechanischen Problem abhängt, wird eine bis dahin laminare Strömung instabil und kleinste Störungen können einen laminar turbulenten Umschlag verursachen. Eine intensiv untersuchte Situation ist die Strömung in einem kreisförmigen Rohr, für die die kritische Reynoldszahl bei 2300 liegt. [35, 152]

$$Re_f = \frac{\dot{V}}{b_f \nu} = \frac{\dot{B}}{\nu} \quad (3.7)$$

Im Fall einer Filmströmung kann die Reynoldszahl als Funktion der Flüssigkeitsbelastung \dot{B} , d. h. des auf die Filmbreite b_f bezogenen Volumenstroms \dot{V} , über Gl. (3.7) bestimmt werden. In Abhängigkeit der Reynoldszahl lässt sich der Film gemäß [6] in die nachfolgenden Kategorien einsortieren:

- $Re_f \leq 3$: laminarer, glatter Film
- $3 < Re_f \leq 400$: pseudolaminarer Film mit Beginn der Wellenbildung (Übergangsbereich)
- $Re_f > 400$: turbulenter Film mit starkem Queraustausch innerhalb des Films

Eine Filmreynoldszahl von $Re_f = 400$ entspräche bei Verwendung von Wasser mit einer kinematischen Viskosität ν von $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ einer Flüssigkeitsbelastung \dot{B} von etwa $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} = 241 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Diese Flüssigkeitsbelastung ist höher als bei den durchgeführten Experimenten, weshalb für die Experimente ein laminares bzw. pseudolaminares Filmverhalten erwartet wird.

Bondzahl

Die Bondzahl Bo berechnet sich aus dem Verhältnis der am Tropfen angreifenden Volumenkräften zur Oberflächenkraft. Für den Fall, dass als Volumenkraft lediglich die Gravitationskraft angreift, lautet die Bondzahl

$$Bo = \frac{\rho g L^2}{\sigma} \quad (3.8)$$

mit der Dichte ρ , der Erdbeschleunigung g , der charakteristische Länge L und der Oberflächenspannung σ . Die Bondzahl lässt damit Rückschlüsse auf die Form des Tropfens zu. Ist sie klein, so ist der Einfluss der Gravitation gering und der Tropfen kugelförmig.

Die Kapillarlänge l_{kap} gibt an, ab welchem Tropfenradius der Schwerkrafteinfluss berücksichtigt werden muss. Die Berechnungsvorschrift wird durch zu Eins setzen der Bondzahl und Umformen nach der charakteristischen Länge gebildet. Für Wasser in Luft beträgt die Kapillarlänge etwa 2,7 mm (vgl. Gl. (3.9)).

$$l_{\text{kap}} = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} = \sqrt{\frac{0,073 \text{ N m}^{-1}}{1000 \text{ kg m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m s}^{-2}}} \approx 2,7 \text{ mm} \quad (3.9)$$

3.4 Begriffsdefinitionen zur Benetzung

Benetzung und Benetzbarkeit

Wie sich eine Flüssigkeit beim Kontakt mit einer festen Oberfläche verhält, wird mit der Benetzung beschrieben. Eine Quantifizierung der Benetzung einer Oberfläche ist über den Kontaktwinkel möglich. Die Benetzbarkeit gibt an, wie stark eine Oberfläche die Bildung einer gemeinsamen Kontaktfläche mit der anliegenden Flüssigkeit anstrebt. Anhand eines auf einer horizontalen Oberfläche liegenden Tropfens können die Unterteilungen der Benetzung und die Benetzbarkeit aufgezeigt werden. Eine schlechte Benetzbarkeit liegt vor, wenn sich der aufgebraute Flüssigkeitstropfen zusammenzieht (vgl. Abbildung 3.2 links). Andererseits liegt eine gute Benetzbarkeit vor, wenn sich der Tropfen flächig ausbreitet, was mit dem Fachbegriff Spreiten betitelt wird (vgl. Abbildung 3.2 rechts). Die Gestalt der Benetzung ist dabei abhängig von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit, der spezifischen Grenzenergie, der freien Oberflächenenergie des Festkörpers sowie der Beschaffenheit der Oberflächen. Während auf realen Oberflächen Inhomogenitäten und Rauigkeit das Benetzungsverhalten beeinflussen können [165], werden ideale Oberflächen als vollkommen glatt angenommen. In numerischen Simulationen wird meist mit idealen Oberflächen gerechnet und auch die nachfolgenden Beschreibungen sind nur für ideale Oberflächen gültig.

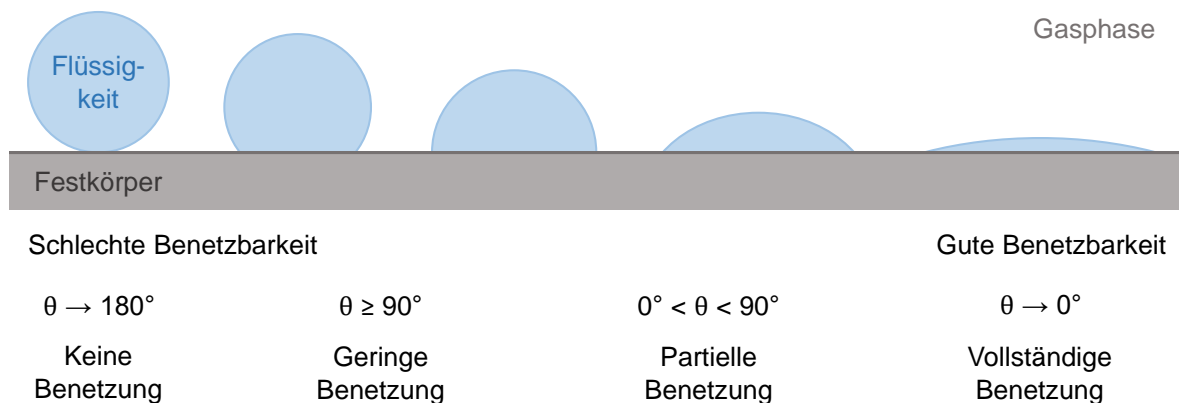


Abbildung 3.2: Benetzbarkeit und Benetzung am Beispiel eines auf einer horizontalen Oberfläche aufgetragenen Flüssigkeitstropfens

Oberflächenspannung und Oberflächenenergie

Die Oberflächenspannung bezeichnet auf makroskopischer Ebene eine Kraft, die tangential zur Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und umgebener Gasphase wirkt. Sie kennzeichnet die zur Vergrößerung einer Oberfläche benötigte Arbeit pro Fläche respektive Kraft pro Längeneinheit und ist verantwortlich für die Bildung von Tropfen. Die Einheit beträgt J m^{-2} bzw. N m^{-1} . Bei mikroskopischer Betrachtungsweise besitzen die Moleküle nahe der Flüssigkeitsoberfläche im Gegensatz zu den Molekülen im Phaseninneren – wie in Abbildung 3.3 schematisch skizziert – eine unterschiedliche Bindung zu den benachbarten Molekülen sowie einen energetisch ungünstigeren Zustand, weshalb eine Flüssigkeit bei Abwesenheit von äußeren Kräfte die Gestalt mit der kleinstmöglichen Oberfläche anstrebt. [16, 111]

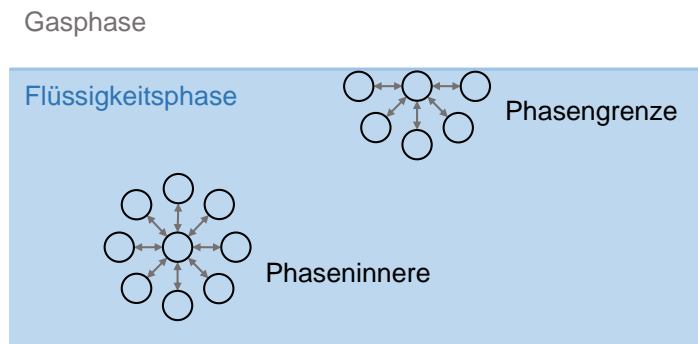


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der zwischenmolekularen Bindungen im Phaseninneren und nahe der Phasengrenze zur Veranschaulichung der Oberflächenspannung (nach [111])

Zwischen den Atomen bzw. Molekülen eines Stoffs treten je nach Abstand zueinander unterschiedliche Wechselwirkungskräfte auf. Nach dem Lennard-Jones-Potential überwiegen bei geringen Abständen die abstoßenden, isotropen Kräfte und bei größeren Abständen die anziehenden Kräfte, die anisotrop und abhängig von der umgebenen Molekülstruktur sind [111]. An der Grenze zwischen Flüssigkeits- und Gasphase liegt ein Dichteübergang vor. Innerhalb dieser wenige Moleküle breiten Schicht stellt sich erneut ein Gleichgewicht zwischen den anziehenden und abstoßenden Wechselwirkungskräften ein. Aus den fehlenden Nachbarmolekülen nahe der Grenzfläche sowie der geringeren Moleküldichte in der Übergangsschicht resultiert in diesem Bereich ein Übergewicht der Adhäsionskräfte. Die Moleküle an der Phasengrenze besitzen eine höhere potentielle Energie, die zu einer starken lokalen Grenzflächenspannung tangential zur Grenzfläche führt. [111]

Die Oberflächenspannung wird oft als konstant angesehen, dabei ist sie abhängig von der Temperatur. Mit steigenden Temperaturen sinkt die Oberflächenspannung gemäß der eötvösschen Regel [47]. Bei reinem Wasser und einer Temperatur von 20°C beträgt diese etwa $0,073 \text{ N m}^{-1}$. Weiterhin kann die Oberflächenspannung durch Zugabe von gewissen Substanzen deutlich verändert werden. Durch Hinzufügen von Tensiden in Wasser fällt sie beispielsweise in einen Bereich von $0,025 \text{ N m}^{-1}$ bis $0,045 \text{ N m}^{-1}$ [53]. Bei Festkörpern wird anstatt der Oberflächenspannung der physikalisch äquivalente Begriff der freien Oberflächenenergie verwendet.

Für die durchgeführten Versuche bei gleichbleibender Temperatur und die dazugehörigen Simulationen kann die Oberflächenspannung des Wassers als konstante Größe angenommen werden, während die freie Oberflächenenergie der Bauteile durch äußere Einflüsse (z. B. Witterungseinflüsse oder Reinigung des Fahrzeugs) verändert werden kann. Durch die daraus resultierende Änderung des Zusammenspiels aus Oberflächenspannung der Flüssigkeit und Oberflächenenergie des Festkörpers wird die Benetzbarkeit der Oberfläche verändert, die laut Literatur eine deutliche Auswirkung auf die Versuchsergebnisse aufweist [139, 150, 162]. Insbesondere die Scheiben eines Fahrzeugs besitzen von Natur aus eine hohe freie Oberflächenenergie und sind daher hydrophil. Grund dafür sind die polaren Atomgruppen SiO^- , SiOH und SiOH_2^+ . Um die Benetzbarkeit der Oberflächen zu verringern und diese hydrophober zu machen, kann die äußere Schicht durch spezielle Behandlungen verändert werden. Beispielsweise können die polaren Atomgruppen durch Silanisierung zu hydrophoben Gruppen umgewandelt werden oder die freie Oberflächenenergie wird durch Auftragung einer dünnen Beschichtung reduziert. [91, 138]

Dieses Phänomen wird in einer Fahrzeugwaschstraße zur Begünstigung des Abperlverhaltens von Wassers ausgenutzt, wodurch das Fahrzeug im letzten Schritt des Reinigungsprozesses mit Luft trocken geblasen werden kann. Da durch Aufbringen einer Oberflächenbeschichtung in den meisten Fällen keine dauerhaft haltende Verbindung eingegangen wird, nutzt sich die Beschichtung sukzessive ab und die Benetzbarkeit der Scheiben steigt wieder. Aus diesem Grund muss die Benetzbarkeit der Oberflächen regelmäßig kontrolliert und gegebenenfalls angepasst werden. Die Benetzbarkeit kann durch in regelmäßigen Abständen wiederholte Messungen des vorliegenden Kontaktwinkels mit dem Kontaktwinkelmessinstrument MobileDrop GH11 von KRÜSS [90] überwacht werden.

Kontaktlinie und Kontaktwinkel

Die Dreiphasenkontaktlinie ist definiert als Abgrenzung zwischen nassen und trockenen Regionen einer Oberfläche. Damit beschreibt sie die Grenze zwischen den drei Phasen fest, flüssig und gasförmig (z. B. Glas, Wasser und Luft). Ist die Flüssigkeit in Ruhe, sind die tangentialen Kräfte an der Kontaktlinie im Gleichgewicht und es wird von einer statischen Kontaktlinie gesprochen.

An der Kontaktlinie stellt sich in Abhängigkeit der Oberflächenspannung σ_{fg} der Flüssigkeit, der freien spezifischen Oberflächenenergie σ_{sg} und der spezifischen Grenzflächenenergie σ_{sf} gemäß der youngschen Gleichung (Gl. (3.10)) für homogene, glatte Oberflächen ein bestimmter Gleichgewichtskontaktwinkel θ ein. YOUNG [170] definierte bereits im Jahr 1805 den Kontaktwinkel als den Winkel zwischen fester und flüssiger Oberfläche nahe der Kontaktlinie (siehe Abbildung 3.4). Solange die Bondzahl sehr viel kleiner als Eins ist, kann der Einfluss durch Gravitation in der youngschen Gleichung vernachlässigt werden.

$$\sigma_{sg} = \sigma_{sf} + \cos(\theta) \sigma_{fg} \quad (3.10)$$

Der Radius eines auf einer Oberfläche aufgetragenen Tropfens ist zusätzlich abhängig vom Tropfenvolumen. Grundsätzlich gilt, dass der Tropfenradius auf hydrophilen größer als auf hydrophoben Oberflächen ist (Spreiten auf hydrophiler Oberfläche). Beim Auftragen

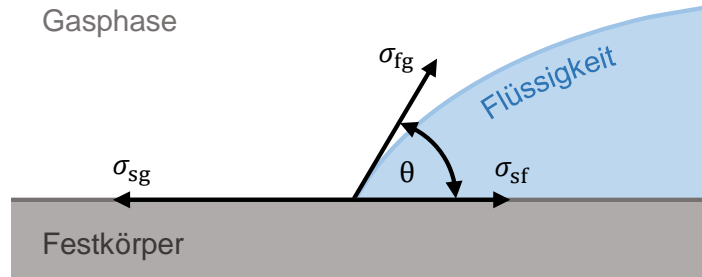


Abbildung 3.4: Darstellung des youngschen Kräftegleichgewichts und Definition des Kontaktwinkels an der Dreiphasengrenze

eines Tropfens zur Messung des statischen Kontaktwinkels sollte idealerweise ein geringes Tropfenvolumen von wenigen Mikrolitern verwendet werden, wodurch gleichzeitig der Einfluss der Gravitationskraft reduziert wird. Für Tropfenradien kleiner als die Kapillarlänge (Gl. (3.9)) können Gravitationseffekte in der Regel vernachlässigt werden.

In der Realität ist der statische Kontaktwinkel einer Materialkombination aufgrund von Rauigkeit, Heterogenität oder Verunreinigungen der Oberfläche kein konstanter Wert [81]. Er kann theoretisch alle Werte im Bereich der Kontaktwinkelhysterese zwischen fortschreitendem (advancing contact angle θ_a) und rückschreitendem Kontaktwinkel (receding contact angle θ_r) annehmen, innerhalb dessen sich die Kontaktlinie nicht bewegt. Wird ein auf einer Oberfläche liegender Tropfen durch Flüssigkeitszufuhr im Volumen vergrößert, bleibt die Kontaktlinie zunächst an ihrer Position und der Kontaktwinkel wächst an. Ab Überschreiten einer gewissen Grenze beginnt die Kontaktlinie zu wandern. Der Grenzwert zwischen statischer und dynamischer Kontaktlinie bei Erhöhung des Tropfenvolumens wird als fortschreitender Kontaktwinkel bezeichnet. Bei Reduktion des Tropfenvolumens verhält sich die Kontaktlinie analog, wobei der Grenzwert in diesem Fall der rückschreitende Kontaktwinkel ist. Im Querschnitt eines Tropfens auf schiefer Ebene sind die dynamischen Kontaktwinkel ebenfalls zu erkennen. Der Zusammenhang zwischen Kontaktwinkel θ und der Kontaktliniengeschwindigkeit u_{kl} in Form der Kapillarzahl

$$Ca = \frac{\mu}{\sigma} u_{kl} \quad (3.11)$$

mit der dynamischen Viskosität μ und der Oberflächenspannung σ ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Ein weit verbreitetes Modell zur mathematischen Beschreibung dieser Korrelation ist das Modell von KISTLER [88]. Die hier aufgeführten Beschreibungen beziehen sich auf den makroskopischen Kontaktwinkel, der mit optischen Methoden zugänglich ist. Demgegenüber steht nach WHITE [166] der mikroskopische Kontaktwinkel, der die Benetzung nahe der Kontaktlinie in mikroskopischer Größenordnung ($\ll 10 \text{ \AA}$) beschreibt. Für weitere Details zur Benetzung wird auf [57, 97] verwiesen.

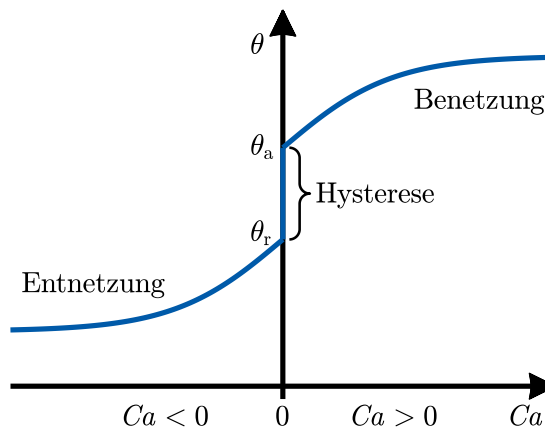


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Kontaktwinkel und Kapillarzahl mit Markierung des fortschreitenden Kontaktwinkels und des rückschreitenden Kontaktwinkels sowie der Kontaktwinkelhysterese

3.5 Wasserpfad am Fahrzeugexterieur

Bei einer Regenfahrt treffen Wasser- und Schmutzpartikel auf die Fahrzeugoberfläche. Die auftreffenden Tropfen verhalten sich je nach Größe, Geschwindigkeit, Auftreffwinkel und Tropfen- sowie Oberflächeneigenschaften unterschiedlich. Der Tropfenaufprall auf eine feste Wand kann im Allgemeinen in die vier Kategorien

- Rebound - Zurückprallen des Tropfens,
- Stick - Haften des Tropfens in Kugelform,
- Spread - Flächige Benetzung der Oberfläche und
- Splash - Zerplatzen des Tropfens in Sekundärtropfen

untergliedert werden, wobei der Regimeumschlag nach BAI [8] von der Weberzahl abhängt. Die auf dem Fahrzeug zurückbleibende Wassermenge akkumuliert anschließend zu Filmen und Rinnsalen, die sich auf der Außenhaut primär durch Luftkräfte und Gravitation weiterbewegen. Entlang des Wasserpfads müssen verschiedene Hindernisse überwunden werden, an denen sich teilweise das Benetzungsregime ändert (vgl. Abbildung 3.6).

Aus der sehr komplexen Bewegung und der Regimeänderung des Wassers auf der Fahrzeugoberfläche können vereinfachte Grundlagenexperimente abgeleitet werden. Solche Experimente sind in Abbildung 3.7 entlang des Wasserpfades dargestellt. Die abgeleiteten Grundlagenexperimente weisen eine deutlich geringere Komplexität auf und legen den Fokus auf ein zu untersuchendes Phänomen. Dadurch ist es möglich, einerseits neue Modelle zum Wassertransport zu entwickeln und andererseits die bereits vorhandenen physikalischen Modelle zu testen, zu bewerten und weiterzuentwickeln. Im Gegensatz zum Vergleich zwischen Experiment und Simulation an einem komplexen Fall, wie beispielsweise dem Wasserübertritt an der A-Säule, bei dem die Einflussfaktoren meist sehr vielfältig und Randbedingungen zum Teil

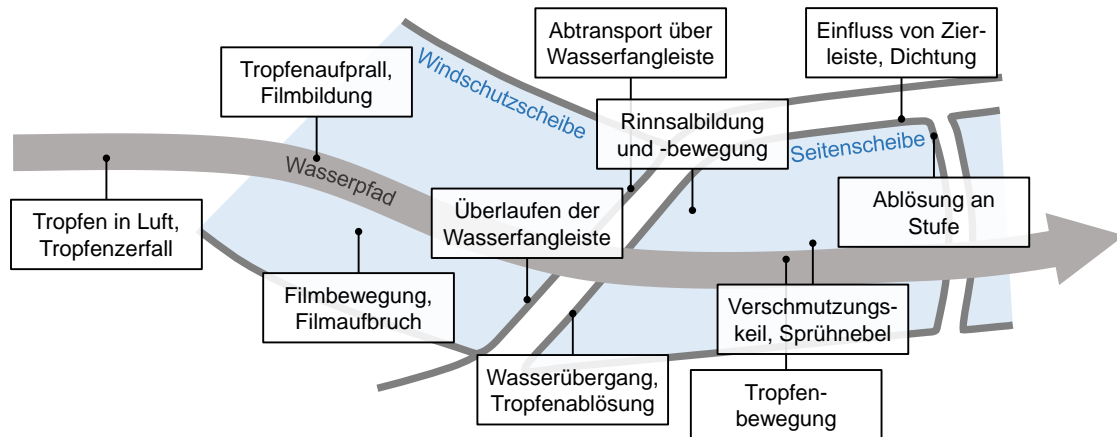


Abbildung 3.6: Wasserpfad am Fahrzeugexterior bei einer Regenfahrt

nicht exakt bekannt sind, lassen sich anhand von Grundlagenexperimenten mit definierten Randbedingungen Hinweise auf potentielle Verbesserungsmöglichkeiten der Modelle erkennen.

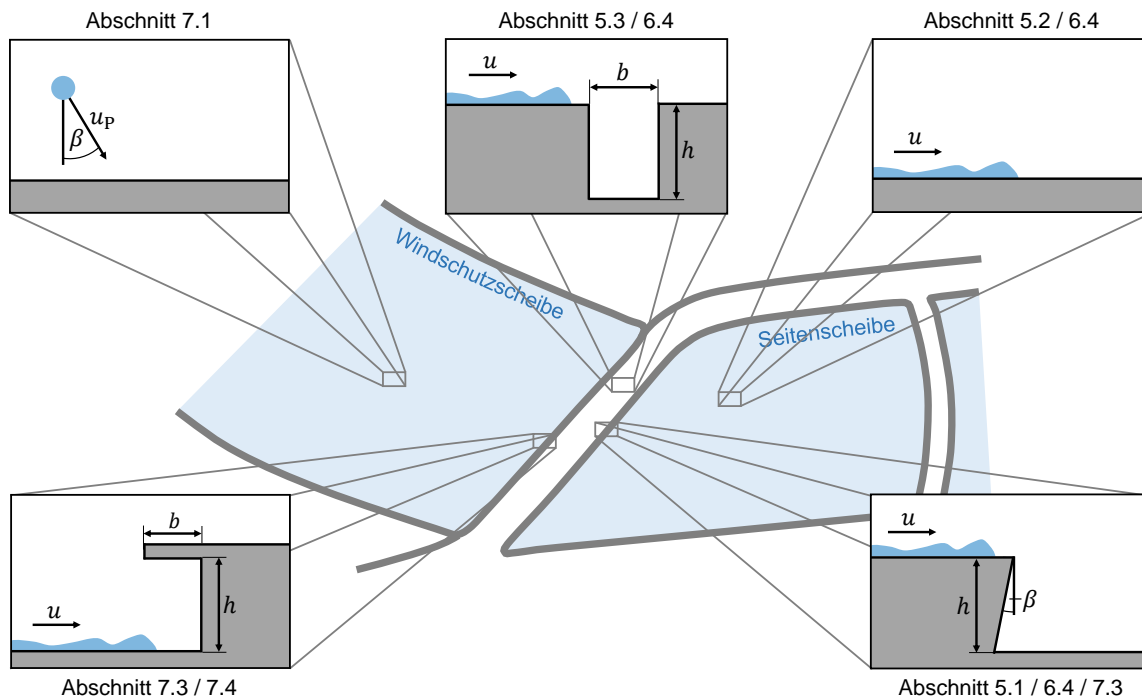


Abbildung 3.7: Am Fahrzeug abgeleitete Grundlagenexperimente mit Verweis auf die jeweils relevanten Abschnitte in dieser Arbeit

3.6 Seitenscheibenbenetzung

Einer der kundenrelevantesten Fälle in Bezug auf die Sichtfreihaltung ist die Fahrt bei Regen und nasser Fahrbahn. Hierbei sollen die Scheiben und Außenspiegel möglichst frei von einer Benetzung bleiben. Insbesondere bei Dunkelheit wird die Sicht durch Lichtbrechung und -reflexion an Flüssigkeitstropfen, Rinnsalen und Filmen auf den Scheiben zusätzlich beeinflusst. Bei einer Regenfahrt lässt sich die Benetzung der Windschutzscheibe nicht verhindern, weshalb heutzutage jedes Fahrzeug mit einem Scheibenwisch- und -waschsystem ausgestattet ist, um die Scheibe von Wasser und Schmutz zu befreien. Bei einem hohen Schmutzanteil des auf die Windschutzscheibe treffenden Wassers, wie z. B. durch Streusalz oder Salzlaken im Winter, führt die reine Wischerbewegung zu verschmierten Scheiben. In diesem Fall ist der Fahrer auf die verbaute Scheibenreinigungsanlage angewiesen, die mittels zusätzlichem Reinigungsmittel den Schmutz löst. Durch die Scheibenwischerbewegung wird Flüssigkeit von der Windschutzscheibe aufgesammelt und zur A-Säule transportiert. Abbildung 3.8 zeigt den Querschnitt einer typischen A-Säule mit Wasserfangleiste und Dichtungen.

Ein Teil der Flüssigkeit wird über die Wasserfangleiste abgeführt und ein Teil gelangt über die A-Säule zur Seitenscheibe. Die zwei wesentlichen Ursachen für eine benetzte Seitenscheibe sind einerseits die Rinnsalbildung aufgrund von über die A-Säule fließendem Wasser und andererseits die Tropfenablagerung. Der Wasserabtransport entlang der A-Säule wird je nach Geschwindigkeit von den aerodynamischen Kräften oder der Gravitation dominiert. Bei hohen Geschwindigkeiten überwiegt der Einfluss der aerodynamischen Kräfte und bei niedrigen Geschwindigkeiten die Gravitationskraft. Besonders bei Geschwindigkeiten von etwa 70 km h^{-1} bis 90 km h^{-1} (je nach Fahrzeugmodell) ist eine überlaufende Wasserfangleiste kritisch, da das Wasser entlang der A-Säule hinabläuft und beim Übertritt das Sichtfeld des Fahrers benetzt. Im Gegensatz dazu wird das Wasser bei höheren Geschwindigkeiten stromabwärts befördert und fließt über das Dach ab oder wird mit dem ausgeprägten A-Säulenwirbel mitgerissen. Die Gestaltung der Wasserfangleiste wirkt sich folglich auf die Benetzung der Seitenscheibe – aber auch auf den Luftwiderstand und den Geräuschpegel in der Fahrgastzelle – aus. [140]

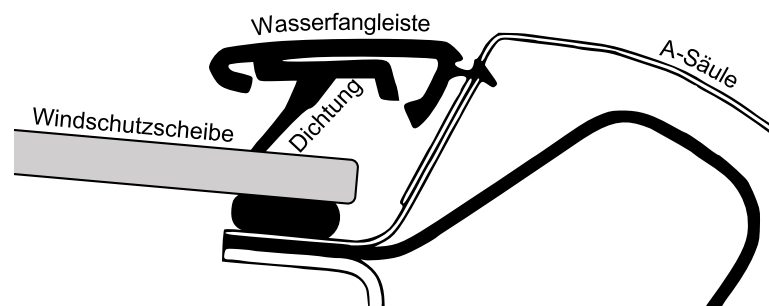


Abbildung 3.8: Querschnitt einer A-Säule mit Wasserfangleiste und Dichtungen (nach [139])

Maßnahmen zur Verbesserung der Seitenscheibenbenetzung

Um der Seitenscheibenbenetzung entgegenzuwirken, gibt es verschiedene Maßnahmen. Die geometrischen Stellhebel sind vor allem an der Wasserfangleiste, der Dichtung, der Zierleiste, der Fensterführung und dem Außenspiegel zu suchen (vgl. gelb hervorgehobene Bereiche in Abbildung 3.9).

Wasserfangleisten sind so zu gestalten, dass sie für sämtliche Geschwindigkeitsbereiche möglichst viel Wasser aufnehmen und wegtransportieren. Neben der Dimensionierung der Fangleiste muss darauf geachtet werden, dass sie zum Design des Fahrzeugs passt und den Widerstand sowie die Windgeräusche nicht unnötig erhöht. Sollte die Wasserfangleiste bei Regenfahrt dennoch ihre Kapazitätsgrenzen erreichen und ein Überlaufen dieser nicht zu verhindern sein, wird über Dichtungen, Zierleisten und Fensterführung an der Seitenscheibe versucht, das übergelaufene Wasser nicht über kritische Bereiche wie das Sichtfenster laufen zu lassen. [139] Als Sichtfenster wird der Bereich der Seitenscheibe bezeichnet, durch den der Fahrzeugführer auf den Außenspiegel blickt (siehe Abbildung 3.9). Zierleisten, Fensterführung und Dichtungen haben folglich einen hohen Stellenwert bei der Verringerung der Seitenscheibenbenetzung.

Weiterhin haben die Außenspiegel einen Einfluss auf das Benetzungsverhalten der Seitenscheibe. Auf das Spiegelgehäuse treffende Regentropfen zerplatzen in Sekundärtropfen, die wesentlich kleiner als die ursprünglichen Tropfen sind und mit der stark turbulenten Umströmung der Außenspiegel auf das Spiegelglas oder die Seitenscheibe getragen werden können. Am Außenspiegel gibt es eine Reihe von Maßnahmen, die ein Wiederauftreffen des vom Außenspiegel abtropfenden Wassers stromabwärts verschieben. So gilt es die Abtropfstellen nach Möglichkeit weit außen am Spiegel zu positionieren, um den Abstand zur Seitenscheibe zu maximieren. Dies wird über Wasserfangrinnen und Wasserführungslippen realisiert. Außerdem wird der Außenspiegel aerodynamisch optimiert, sodass ein Druckgefälle erzeugt

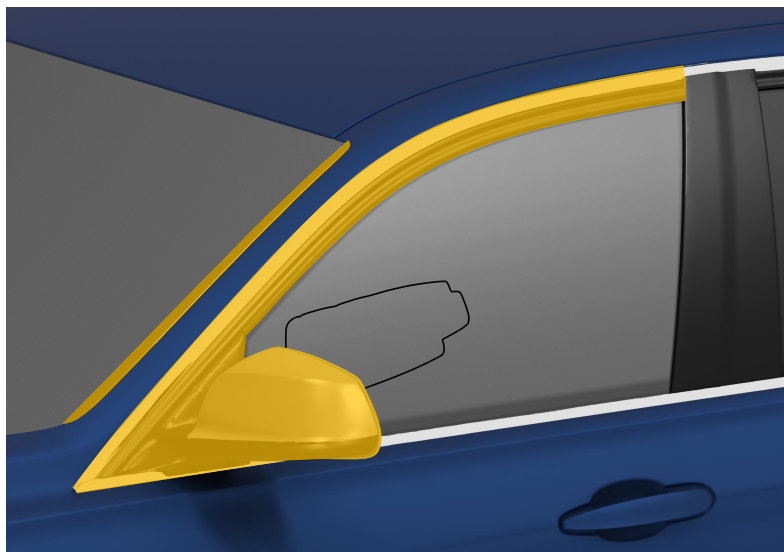


Abbildung 3.9: Sensitive Bereichen zur Beeinflussung der Seitenscheibenbenetzung (Markierung auf der Seitenscheibe kennzeichnet das Sichtfenster)

wird, das den Wassertransport nach außen hin fördert. Eine weitere Möglichkeit bilden Spoiler am Spiegeldreieck, die die Strömung inklusive der darin transportierten Tropfen von der Seitenscheibe weggleiten. [11]

Entwicklungswerkzeuge

Bei der Fahrzeugentwicklung gewinnen numerische Entwicklungswerkzeuge zunehmend an Bedeutung. Dennoch ist der Windkanal bis heute das wichtigste Werkzeug bei der aerodynamischen Entwicklung. Dies liegt mitunter an der Herstellbarkeit von reproduzierbaren Versuchsbedingungen, die eine Optimierung überhaupt erst ermöglichen. In dieser Arbeit werden Untersuchungen im AEROLAB, einem rein aerodynamischen Windkanal, und im Umweltwindkanal (UWK) durchgeführt. Die Besonderheit des UWK liegt in der Simulation diverser Umwelteinflüsse wie starke Sonneneinstrahlung, Schnee oder Regen bei gleichzeitiger Abbildung der Fahrzeugdurch- und -umströmung. Nach der Beschreibung beider Windkanäle wird in diesem Kapitel auf die Filmhöhenbestimmung einer Fluoreszenzaufnahme eingegangen. Des Weiteren wird ein Überblick der für diese Arbeit relevanten, numerischen Mehrphasenmodelle (Lagrange-Partikel, Fluidfilmmodell, Volume-of-Fluid-Methode und hybrides Fluidfilm-VOF-Modell) gegeben. Mit Erläuterung der Darstellungsmöglichkeiten von Netzbewegungen in einer Simulation wird die Basis zum Verständnis der Mehrphasensimulationen zur Scheibenwischerbewegung geschaffen. Im letzten Abschnitt wird mit Blick auf die folgenden Kapitel dieser Arbeit eine Übersicht zu den benötigten Rechenzeiten der verschiedenen Simulationsfälle gegeben.

4.1 Aerodynamische Entwicklungswerkzeuge

4.1.1 AeroLab der BMW Group

Seit 2009 verfügt die BMW Group über das Aerodynamische Versuchszentrum (AVZ) mit zwei Windkanäle, die zur idealen Platzausnutzung ineinander gebaut sind. Der größere Windkanal (AWK) besitzt eine horizontale Luftführung und umschließt damit den im Ring der Luftführung sitzenden, zweiten Windkanal (AEROLAB). Abgesehen von der Größe unterscheiden sich die beiden Windkanäle in der Bodensimulation. Im AWK wird ein 5-Band-System eingesetzt und im AEROLAB ein 1-Band-System. Das AEROLAB ist ein Kanal nach Göttinger Bauart mit einem Gebläse, das die Luft auf bis zu 300 km h^{-1} beschleunigen kann. Die Luft wird über Umlenkecken mit Wärmetauschern in einem vertikalen Kreislauf geführt. Dabei strömt sie zunächst durch Strömungsgleichrichter und Turbulenzsieb, ehe sie durch die 14 m^2 große Düsenaustrittsfläche in die offene Messstrecke gelangt. Nach Durchlauf des Plenums wird die Luftströmung wieder mit dem Kollektor eingefangen und über Umlenkecken zum Gebläse befördert (vgl. Abbildung 4.1). Um ein möglichst blockförmiges Grenzschichtprofil zu erzeugen, wird die Bodengrenzschicht in der Düse durch einen Scoop abgeschnitten. Zusätzlich ist direkt

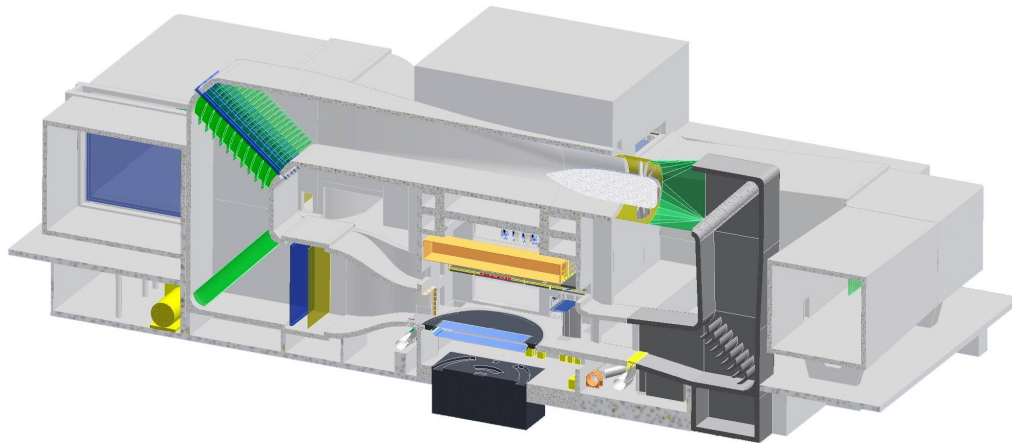


Abbildung 4.1: AeroLab der BMW Group [20]

vor dem Laufband eine Grenzschichtabsaugung und gleichzeitige tangentielle Ausblasung vorhanden. Diese Eingriffe sind nötig, um das Fahrzeugmodell auf dem 1-Band-System mit einem blockförmigen Geschwindigkeitsprofil, das vergleichbar mit dem bei einer Straßenfahrt ist, anzuströmen. Das verbaute Stahllaufband der Rolling Road hat eine Breite von 3,2 m und eine Länge von 9 m. Ein 1:1-Realfahrzeugs wird auf dem Bandsystem über zwei an den Vorderrädern befestigte Schiebeanke fixiert. [18, 35, 136]

4.1.2 Umweltwindkanal der BMW Group

Der Umweltwindkanal befindet sich im am AVZ angrenzenden energietechnischen Versuchszentrum (EVZ), das seit 2010 im Forschungs- und Innovationszentrum (FIZ) in München betrieben wird. Der in Abbildung 4.2 dargestellte Umweltwindkanal ist wie das AEROLAB nach Göttinger Bauart mit vertikaler Luftführung. Die Luftströmung wird über Umlenkecken im Kreislauf geführt und erreicht eine maximale Windgeschwindigkeit von 250 km h^{-1} in der Messstrecke. Wärmetauscher, Feuchteregulierung und Strömungsgleichrichter sorgen für definierte Bedingungen der Luft bei Temperaturen von -20°C bis 55°C . Die Windkanaldüse besitzt eine Grenzschichtabsaugung und hat einen Querschnitt von $8,4 \text{ m}^2$. Über den Rollenantrieb wird die Raddrehung ermöglicht. Die Abgase des Motors werden während des Betriebs abgesaugt. Ein verschiebbares Regenrack mit bis zu 16 in einem 4×4 Raster angeordneten Düsen kann unmittelbar nach der Düse platziert werden, um feine Wassertropfen in die Luftströmung einzubringen. [19]

Für den klassischen Seitenscheibenbenetzungsversuch wird in der Regel die zweithöchste Düsenreihe verwendet, wobei die äußerste Düse auf die Mitte des fahrerseitigen Außenspiegels zeigt. Die vier Weitwinkeldüsen mit einem vollkegelförmigen Spray vom Typ FullJet 2.8W der Firma SPRAYING SYSTEMS [148] werden mit einem Gesamtmassenstrom von $0,11 \text{ s}^{-1}$ betrieben (vgl. [162]). Die verwendete Flüssigkeit ist Wasser, wobei eine geringe Menge eines fluoreszierenden Additivs beigemischt wird, um es im abgedunkelten Kanal mittels der Fluoreszenzmethode sichtbar zu machen. Die Bestrahlung zur Anregung der Fluorophore wird über drei oberhalb der Windkanaldüse platzierte UV-LED-Strahler und zwei seitliche

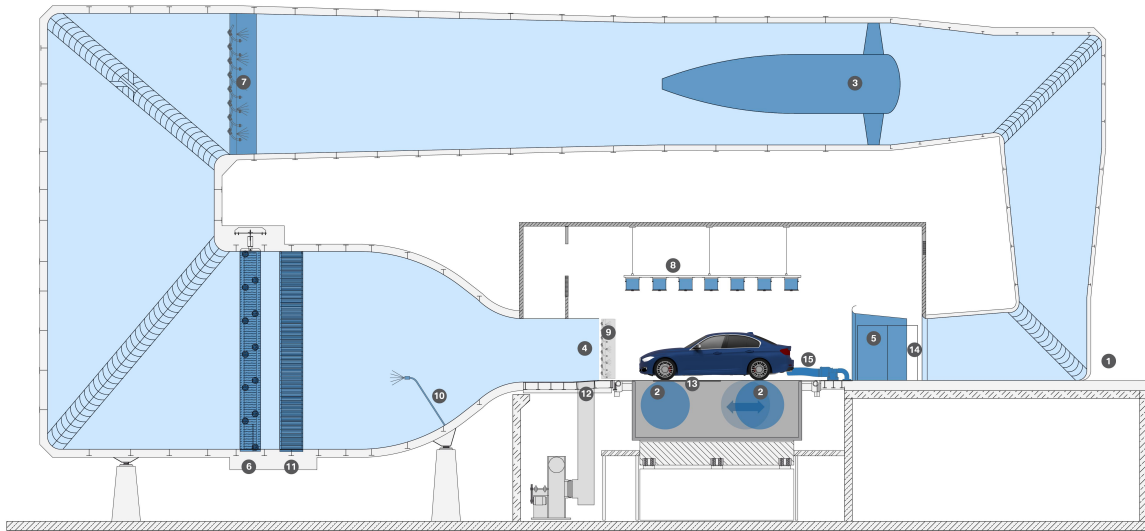


Abbildung 4.2: Umweltwindkanal der BMW Group (in Anlehnung an [19]) mit 1 - Fahrzeugeinbringung, 2 - Rollenantrieb, 3 - Gebläse, 4 - Düse, 5 - Kollektor, 6 - Wärmetauscher, 7 - Feuchteregulierung, 8 - Sonnensimulation, 9 - Regensimulation, 10 - Schneelanze, 11 - Strömungsgleichrichter, 12 - Grenzschichtabsaugung, 13 - Flachband für Motorräder, 14 - Betankungsstation und 15 - Abgasabsaugung

UV-LED-Strahler, die sich auf einem verschiebbaren Wagen befinden, sichergestellt (vgl. Abbildung 4.3). Weiterhin besteht die Möglichkeit einen zusätzlichen, frei platzierbaren UV-LED-Strahler zur gezielten Ausleuchtung einzusetzen. Die staubdichten und wassergeschützten UV-LED-Flächenleuchten ZERO 500/5 IP65 von HELLING [69] sind jeweils individuell in der Intensität feinjustierbar. Zur Aufnahme der Versuche ist eine oberhalb der Windkanaldüse fest verortete Kamera mittig auf das Fahrzeug gerichtet und zwei weitere Kameras befinden sich auf dem Wagen mit den seitlichen Lichtstrahlern. Der Wagen wird beim typischen Versuchsaufbau 2,8m neben dem Versuchsfahrzeug platziert. Die frontale, monochrome Netzwerkkamera sowie eine der seitlichen Kameras sind vom Typ AV GT2450 von STEMMER IMAGING [155] mit einem Bandpassfilter BP465 HT von SCHNEIDER KREUZNACH [83] und werden zur Videoaufzeichnung genutzt, während die dritte 5 Megapixel Monochrom-Kamera JAI BM-

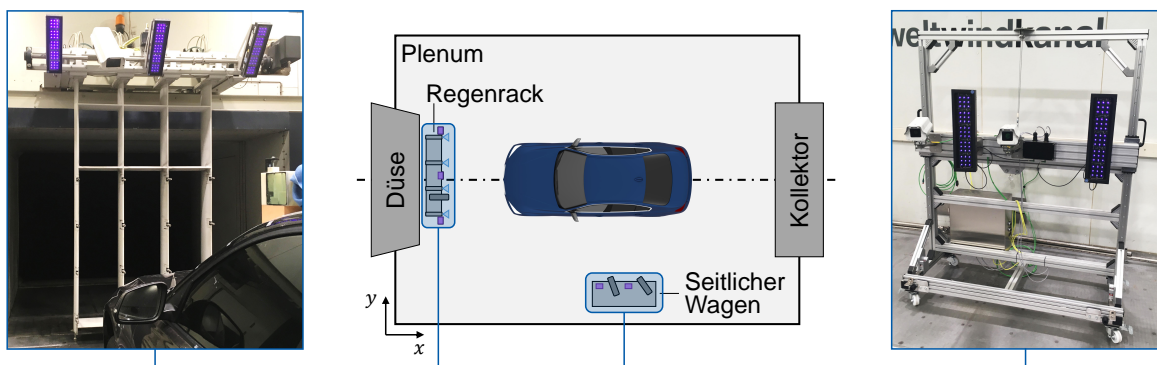


Abbildung 4.3: Aufbau des Messsystems im Umweltwindkanal mit Positionen der Kameras und UV-LED-Strahler

500 von JAI [78] mit einem Präzisionsobjektiv MeVis-C 1.6/16T von QIOPTIQ [129] und einem blauen Bandpassfilter MidOpt BP470 von MIDWEST OPTICAL SYSTEMS [117] zur Einzelbildaufnahme der Seitenscheibe dient. Die Kameras besitzen bei voller Auflösung jeweils eine Bildfrequenz von 15 Hz. Die Benetzung der Seitenscheibe wird damit ausschließlich optisch gemessen. Dies hat den Vorteil, dass die Fahrzeugumströmung nicht durch die verwendete Messtechnik beeinflusst wird. [162]

4.2 Fluoreszenz und Filmhöhenbestimmung

4.2.1 Fluoreszenz

Die spontane Emission von Licht während der Anregung mit elektromagnetischer Strahlung wird als Fluoreszenz bezeichnet. Sie basiert auf Absorption und Emission. Bei der Bestrahlung von Fluorophoren – d. h. Systemen, die zur Fluoreszenz geeignet sind – mit (ultraviolettem) Licht absorbieren die Elektronen der fluoreszierenden Moleküle die Anregungsenergie. Dabei werden die Elektronen auf ein höheres, instabiles Energieniveau gehoben. Beim Herabfallen auf das ursprüngliche Energieniveau wird Energie frei, die zum Großteil in Form von Strahlung emittiert wird. Da die Anregungsenergie zusätzlich in thermische Energie gewandelt wird, ist die emittierte Strahlung energieärmer als die absorbierte Strahlung und die Wellenlänge ist rotverschoben. Dieser Zusammenhang ist als Stokes-Verschiebung bekannt. Aufgrund der Wellenlängenverschiebung kann das Anregungslicht (UV-Licht) von der emittierten Strahlung (blau leuchtende Fluoreszenz) getrennt werden. Durch Verwendung eines Filters vor der Kamera wird das detektierbare Wellenlängenspektrum begrenzt, wodurch Fehldetektionen durch Reflexionen oder störende Lichtquellen minimiert werden. Beim Versuchsaufbau sind die Anregungslichtquellen und Kameras jeweils nebeneinander platziert und auf das Messobjekt

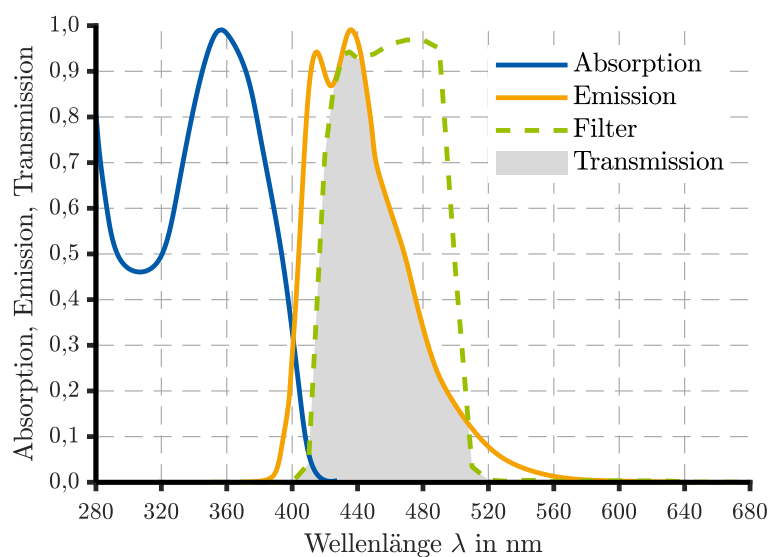


Abbildung 4.4: Spektrum der normierten Absorption und Emission des Fluoreszenzmittels Tinopal SFP sowie Transmissionsbereich des Bandpassfilters MidOpt BP470. Der grau hinterlegte Bereich wird vom Kamerasystem detektiert (nach [12, 117, 162])

gerichtet. Abbildung 4.4 zeigt das Spektrum der Absorption und Emission des fluoreszierenden Additivs Tinopal SFP [12] von BASF und verdeutlicht die Wellenlängenverschiebung des Fluoreszenzlichts. Gleichzeitig ist das Spektrum des Bandpassfilters MidOpt BP470 von MIDWEST OPTICAL SYSTEMS [117] sowie der Detektionsbereich der Kamera eingezeichnet. Der Vorteil des verwendeten Filters liegt in der Reduktion von Fehldetektionen. Nachteilig hingegen sind der leicht reduzierte, maximale Transmissionsgrad und der ausgeschlossene Emissionsbereich bei Wellenlängen kleiner 420 nm. [162]

4.2.2 Filmhöhenbestimmung mittels Kalibrierlehre

Im abgedunkelten Umweltwindkanal kann das Wasser durch Verwendung der Fluoreszenzmethode sichtbar gemacht werden. Das während eines Versuchs aufgezeichnete Bild- und Videomaterial wird zunächst in Graustufen gespeichert, wobei ein Bildpixel umso heller leuchtet, je dicker die Wasserfilmschicht auf einer Stelle ist. Durch Ausnutzung des Durchstrahlungsgesetzes von LAMBERT [93] und BEER [14] kann mit vorheriger Kalibrierung bei gleichem Mischungsverhältnis von Fluoreszenzagent und Wasser sowie unverändertem Versuchsaufbau auf die Filmhöhe zurückgeschlossen werden. Zur Nachvollziehbarkeit des Verfahrens zur Filmhöhenmessung wird eine an [162] angelehnte Kurzerklärung aufgezeigt. Für eine detaillierte Herleitung wird auf [2] verwiesen. Das in Gl. (4.1) aufgeführte Durchstrahlungsgesetz von LAMBERT und BEER erfasst die Intensitätsabnahme einer Strahlung der Wellenlänge λ beim Durchgang durch ein absorbierendes Medium der Dicke d_s mit der Stoffmengenkonzentration der absorbierenden Substanz c_s und dem Extinktionskoeffizienten ε_s . I_E ist die einfallende Lichtintensität und I_A die abgeschwächte, transmittierte Lichtintensität.

$$I_A = I_E e^{-\varepsilon_s c_s d_s} \quad (4.1)$$

Die einfallende Intensität I_E wird im Wesentlichen von der verwendeten Leuchtquelle und dem Abstand zum Messobjekt bestimmt. Wird der Abstand zwischen Leuchtquelle und Messobjekt halbiert, so vervierfacht sich die Intensität. Aufgrund der starken Abstandsabhängigkeit ist die relative Positionierung zwischen Leuchtquelle, Messobjekt und Kamera entscheidend für reproduzierbare Versuchsbedingungen. Je nach Dicke der Schicht bzw. des Flüssigkeitsfilms wird die ursprüngliche Intensität mehr oder weniger stark abgeschwächt. Der dabei auftretende Intensitätsverlust I_V ergibt sich aus der Differenz von einfallender und transmittierter Intensität gemäß Gl. (4.2).

$$I_V = I_E - I_A = I_E \left(1 - e^{-\varepsilon_s c_s d_s}\right) \quad (4.2)$$

Da die aufgenommene Energie im Fluoreszenzmittel-Wasser-Gemisch nicht gänzlich zur Fluoreszenz beiträgt (thermische Verluste), kann die Intensität der Fluoreszenz I_F mit Hilfe eines Skalierungsfaktors Ψ wie in Gl. (4.3a) beschrieben werden. Daraus lässt sich ein Modell mit drei unbekannten Parametern ableiten, das die Intensität in Abhängigkeit der Filmhöhe h_f angibt (vgl. Gl. (4.3b)).

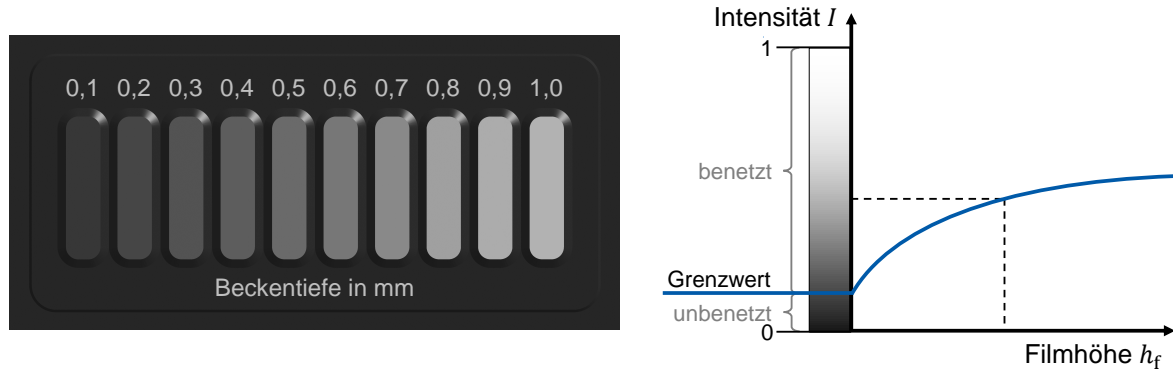


Abbildung 4.5: Kalibrierlehre mit verschiedenen tiefen Becken (links) und schematische Abhängigkeit zwischen Helligkeit und Filmhöhe (rechts)

$$I_F = \Psi I_V = \Psi I_E \left(1 - e^{-\varepsilon_s c_s d_s}\right) \quad (4.3a)$$

$$I(h_f) = \tilde{C}_1 \left(1 - e^{-\tilde{C}_2 h_f}\right) + \tilde{C}_3 \quad (4.3b)$$

Durch Zusatzmessungen mit einer Kalibrierlehre (siehe Abbildung 4.5 links) kann eine Korrelation zwischen Filmhöhe und Grauwert bestimmt werden. Die Kalibrierlehre setzt sich aus einer Grundplatte mit zehn unterschiedlich tiefen Becken in einer Zehntelmillimeter-Abstufung von 0,1 mm bis 1,0 mm, einer Deckelplatte mit UV-Licht durchlässiger Scheibe und einer dazwischenliegenden Dichtung zusammen. Zur Kalibrierung der Filmhöhe wird die Lehre mit dem Fluoreszenzagent-Wasser-Gemisch gefüllt und verschlossen. Die zwischen den Platten befindliche Dichtung sorgt dafür, dass beim Aufstellen der Lehre keine Flüssigkeit ausläuft. Die gefüllte Lehre wird nun an die relevanten Stellen der späteren Auswertung gehalten und unter gleichen Bedingungen wie im Versuch aufgenommen. Für jedes der zehn durch Stege getrennten Becken wird die mittlere Intensität sowie die Standardabweichung errechnet, wobei beim Berechnungsvorgang möglicherweise hinter der Glasscheibe eingeschlossene Luftblasen oder auf der Glasscheibe liegende Tropfen ausgeschlossen werden, um das Ergebnis nicht zu verfälschen. Damit werden den zehn verschiedenen Filmdicken jeweils Helligkeitswerte zugeordnet. Mit Hilfe dieser Stützstellen lassen sich die unbekannten Parameter \tilde{C}_1 , \tilde{C}_2 und \tilde{C}_3 in Gl. (4.3b) bestimmen und Messungen von Filmhöhen realisieren.

Wird die Kalibriermessung vor den Versuchen nicht durchgeführt, kann aus der Helligkeitsinformation nur eine qualitative Filmhöhe abgeleitet werden. Diese Information ist oftmals ausreichend, insbesondere wenn lediglich zwischen benetzten und unbenetzten Flächen unterschieden werden soll. Hierfür ist die Definition eines festen Helligkeitsgrenzwerts nötig, ab der eine Stelle als benetzt angesehen wird (vgl. Abbildung 4.5 rechts). Der Grenzwert kann beispielsweise empirisch bestimmt werden. Er sollte möglichst niedrig sein, um die kleinsten Tropfen auf der Oberfläche zu erfassen, und dennoch ausreichend hoch, um in der Luft zwischen dem Messobjekt und der Kamera befindliche Tropfen nicht zu detektieren. Eine Studie zu verschiedenen Helligkeitsgrenzwerten und deren Einfluss auf den Benetzungsgrad einer Seitenscheibe ist in [162] zu finden. Für die Simulationen wird analog eine Mindestfilmhöhe definiert, ab der eine relevante Benetzung vorliegt.

Es sei angemerkt, dass Fluorophore durch dauerhafte Bestrahlung mit Anregungslicht photochemisch zerstört werden und ihre Fähigkeit zur Fluoreszenz verlieren. Dieser Effekt wird Photobleichung genannt und ist die Ursache für den permanenten Verlust der Fluoreszenz [147]. Der Effekt ist umso stärker je höher die Intensität und die Energie des Anregungslichtes ist und abhängig vom jeweiligen Fluorophor sowie seiner chemischen Umgebung. Um den Effekt der Photobleichung möglichst gering zu halten, wird idealerweise stets neues mit Fluorophoren geimpftes Wasser eingebracht und die Bestrahlung der Flüssigkeit mit Anregungslicht erst kurz vor der Messung gestartet. Dies ist beim klassischen Seitenscheibenbenetzungsversuch durch das permanente Einbringen von frischer Fluoreszenzflüssigkeit über Sprayer hinter der Windkanaldüse sichergestellt. Bei Versuchen, die einen Flüssigkeitseintrag an einer definierten Stelle benötigen, sollte die Zuleitung UV-Licht undurchlässig gestaltet oder mit schwarzer Folie abgeklebt werden. Bei den Experimenten zur Validierung der Scheibenwischermethodik werden die wasserbeinhaltenden Bauteile jedoch nicht komplett abgeklebt, da der Flüssigkeitspegel in Wassertank, Zuleitung und Wasseraustrittskörper regelmäßig kontrolliert werden muss. Weiterhin kann nicht auf eine gepulste Anregung (wie in [2]) ausgewichen werden. Aus diesem Grund dient die farbliche Einfärbung zur Abschätzung der Filmhöhe und Sichtbarmachung des Wassers auf der Fahrzeugoberfläche.

Zur Untersuchung der kontinuierlichen Abnahme der Fluoreszenz während anhaltender Bestrahlung mit Anregungslicht wird das abgeschlossene Volumen der Kalibrierlehre mit einem Tinopal-Wasser-Gemisch befüllt und über mehrere Minuten mit dem Kamerasystem aufgenommen. Zu einem Liter Wasser werden 0,39 g Tinopal SFP beigelegt. Die zugegebene Menge des Additivs Tinopal SFP wurde in Versuchen als guter Kompromiss ermittelt. Sie ist sehr gering, sodass das Fließverhalten von Wasser nicht beeinflusst wird und gleichzeitig hoch genug, um eine messbare Intensität zu erzeugen. Die Bilder werden mit dem in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Kamerasystem im 8-Bit-Modus erfasst. Damit weisen die einzelnen Bildpunkte einen Grauwert von 0 bis 255 auf. Die Blende der Kamera wird bei den Aufnahmen vollständig geöffnet, um die größtmögliche Menge an Licht einzufangen. Das Anregungslicht wird erst nach dem Start des mehrminütigen Messvorgangs eingeschaltet, um ein frühzeitiges photochemisches Zersetzen der Fluorophore zu vermeiden. Im Nachhinein wird das Startbild bestimmt und die weiteren Bilder nach den gewünschten Zeitspannen herausgesucht. Für jedes Bild wird die Zuordnung von Helligkeitswert zur Filmhöhe ermittelt.

Abbildung 4.6 zeigt die Abnahme der normierten Fluoreszenzintensität bei permanenter Anregung mit UV-Licht für die zwei verschiedenen Bestrahlungsintensitäten von $100 \mu\text{W cm}^{-2}$ (Abbildung 4.6a) und $300 \mu\text{W cm}^{-2}$ (Abbildung 4.6b). Die Beleuchtungsintensität der UV-LED-Strahler wird dabei über Regler (ohne Veränderung des Abstands zwischen Leuchtquelle und Messobjekt) eingestellt und mit dem Kombi UV-Intensitäts- und Luxmeter von HEL-LING [70] überprüft. Das Mischungsverhältnis von Fluoreszenzagent und Wasser ist in beiden Fällen gleich. Die blaue Kurve repräsentiert die Ausgangsmessung zum Startzeitpunkt der Bestrahlung mit Anregungslicht. Die Kurven in den Farben gelb, grün, violett und rot sind jeweils nach ein-, zwei-, drei- und vier-minütiger Bestrahlung aufgenommen und verdeutlichen den Effekt der Photobleichung. Mit zunehmender Bestrahlungsdauer nimmt die Emissionsintensität der Fluoreszenz ab. Bei der höheren Anregungsintensität ist die Ausgangsmessung auf einem höheren Startniveau, fällt hingegen deutlich stärker ab. Bereits nach einminütiger Bestrahlung halbiert sich die Fluoreszenzintensität beinahe vollständig. Grundsätzlich wird

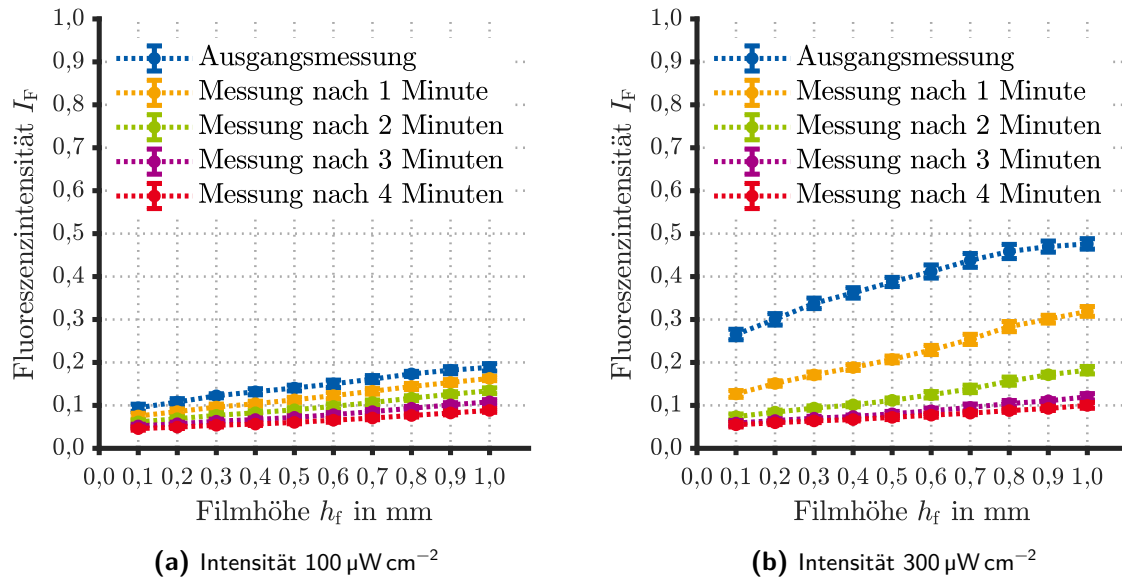


Abbildung 4.6: Zeitliche Abnahme der Fluoreszenzintensität bei permanenter Bestrahlung mit Anregungslicht bei einem konstanten Mischungsverhältnis des Fluoreszenzmittels von $0,39 \text{ g l}^{-1}$ und einer Bestrahlungsintensität von $100 \mu\text{W cm}^{-2}$ (links) und $300 \mu\text{W cm}^{-2}$ (rechts)

eine intensive Fluoreszenz sowie eine Abhängigkeitskurve mit gut unterscheidbaren Filmhöhen wie z. B. die blaue Kurve in Abbildung 4.6b angestrebt. Da in diesem Fall die Fluoreszenz jedoch mit andauernder Beleuchtungsdauer stark abnimmt, verliert die Kalibrierung bereits nach kurzer Zeit ihre Gültigkeit. Die Beleuchtungsdauer der Fluoreszenzflüssigkeit sollte daher so kurz wie möglich und so lang wie nötig gehalten werden. Idealerweise wird die Fluoreszenzflüssigkeit erst kurz vor der Messung angeregt, um eine unnötige Bestrahlung zu vermeiden. Bei einer geringeren Intensität des Anregungslichts ist die Abnahme der Fluoreszenz zwar weniger ausgeprägt, allerdings erreicht die maximale Helligkeit dabei nur etwa 20 % und die Helligkeitswerte der einzelnen Filmhöhen liegen deutlich näher aneinander, was eine Differenzierung erschwert. Durch Erhöhung der Konzentration des Fluoreszenzagenten kann die Fluoreszenzintensität erhöht werden, jedoch tritt dadurch die Sättigung des Kurvenverlaufs bereits früher ein. Für Untersuchungen zur klassischen Seitenscheibenbenetzung sind folglich geringere UV-Intensitäten besser geeignet, zumal hierbei der Helligkeitsgrenzwert zwischen benetzter und unbenetzter Oberfläche für eine längere Zeitspanne auf einem vergleichbaren Niveau bleibt.

4.3 Numerische Simulationswerkzeuge

Zur numerischen Lösung eines strömungsmechanischen Problems existieren zahlreiche kommerzielle sowie freie Softwarepakete für technische Anwendungen, die meist auf den Navier-Stokes-Gleichungen [152] (z. B. STAR-CCM+ oder OPENFOAM) oder der aus der Gaskinetik stammenden Lattice-Boltzmann-Methode [67] (insbesondere POWERFLOW) basieren. Die kontinuumsmechanischen Erhaltungsgleichungen und die gaskinetische Boltzmann-Gleichung

werden in der Regel numerisch gelöst, weshalb eine Diskretisierung der Grundgleichungen notwendig ist und bei deren Lösung numerische Verfahren genutzt werden. Für Details zur Diskretisierung und den numerischen Verfahren wird auf [50, 135] verwiesen.

Zu Beginn der Arbeit wurden verschiedene CFD-Programme hinsichtlich deren Möglichkeiten zur Berechnung von Mehrphasenproblemen begutachtet, um das für die Aufgabe am besten geeignete Programm zu bestimmen. Dabei wurden neben den auf den Navier-Stokes-Gleichungen oder der Lattice-Boltzmann-Methode basierenden Programmen solche, die mit Smoothed Particle Hydrodynamics [60] arbeiten, herangezogen. Aufgrund der bereits vorhandenen Modelle in der Software, aber auch hinsichtlich der Integration in den Fahrzeugentwicklungsprozess bei BMW, fiel die Wahl auf STAR-CCM+ von SIEMENS. Die Simulationen in dieser Arbeit werden mit der Version 2019.1 [145] durchgeführt.

4.4 Numerische Mehrphasenmodelle

Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die Grundlagen zu den in dieser Arbeit eingesetzten numerischen Mehrphasenmodellen. Durch stetig steigende Rechenleistung und kontinuierliche Weiterentwicklung der Modelle werden numerische Simulationen verstärkt zur Untersuchung von Mehrphasenproblemen eingesetzt. Je nach Anwendungsfall und benötigtem Detaillierungsgrad werden dazu passende Modelle gewählt und bei Bedarf miteinander gekoppelt. Am Beispiel des Wasserpfades entlang der Fahrzeugoberfläche bei einer Regenfahrt (vgl. Abschnitt 3.5) werden die benötigten Modelle aufgezeigt. Die Bewegung der dispersen Wassertropfen kann entweder implizit mit einem Euler-Euler-Ansatz (Disperse Mehrphasen) oder explizit mit einem Euler-Lagrange-Ansatz (durch Lagrange-Partikel) modelliert werden. Zur Berechnung der Interaktion der Tropfen mit der Wand sind verschiedene Modelle wie beispielsweise das Bai-Gosman-Modell [9] vorhanden. Für die Simulation der Benetzung auf Oberflächen kann bei einfachen Geometrien und sehr dünnen Filmen das Fluidfilmmodell verwendet werden. Bei komplexeren Oberflächen und höheren Genauigkeitsanforderungen kann die Phasengrenze zwischen der Luft- und der Wasserphase entweder implizit mit Interface-Capturing-Verfahren und einem skalaren Indikator oder explizit mit Interface-Tracking-Verfahren (z. B. Gitteranpassung an der Grenzfläche) beschrieben werden. Die weit verbreitete Volume-of-Fluid-Methode ist ein Beispiel für eine implizite Berechnung der Phasengrenze. Zur Optimierung der Rechenzeit eignet sich ein hybrider Fluidfilm-VOF-Ansatz, der die Vorteile beider Verfahren vereint.

4.4.1 Lagrange-Partikel

Eine Simulation mit Lagrange-Partikeln eignet sich für Situationen, in denen eine kontinuierliche Fluidphase und eine disperse Phase vorliegen. Die disperse Phase liegt meist nur in einer niedrigen Konzentration vor. Die kontinuierliche Phase wird dabei in einer eulerischen Betrachtungsweise beschrieben, d. h. das Strömungsfeld wird von einem raumfesten Punkt beobachtet. Bei der dispersen Phase hingegen bewegt sich der Beobachter mit der Partikelposition mit. Hierbei wird von einer lagrangeschen Betrachtungsweise gesprochen.

Aus Effizienzgründen werden in einer solchen Simulation Partikel gleicher Eigenschaften zu Partikelpaketen (sogenannte Parcel) zusammengefasst. Für jedes Partikelpaket wird eine Trajektorie bestimmt.

Die Kopplung zwischen kontinuierlicher Fluidphase und disperser Partikelphase ist über verschiedene Ansätze möglich [53]:

- Die **Einwegekopplung** (Fluid \rightarrow Partikel) ist bei einer sehr dünnen, dispersen Partikelphase ausreichend. Hierbei wirkt ausschließlich die Fluidphase auf die Partikelphase (vor allem Widerstand und Auftrieb). Die Strömung wird durch die geringe Partikelanzahl nicht gestört.
- Bei der **Zweiwegekopplung** (Fluid \rightarrow Partikel | Partikel \rightarrow Fluid) wird zusätzlich der Impulsaustausch von Partikeln auf die Strömung berücksichtigt. Es entsteht ein wechselseitiger Austausch. Die Turbulenz kann durch die vorhandenen Partikel in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Partikeldurchmesser zur kolmogorowschen Länge verstärkt oder geschwächt werden.
- Die **Dreiwegekopplung** (Fluid \rightarrow Partikel | Partikel \rightarrow Fluid | Partikel \rightarrow Fluid \rightarrow Partikel) berücksichtigt zusätzlich die Wirkung der durch andere Partikel beeinflussten Strömung (z. B. Nachlauf) auf Partikel. Sie wird bei zunehmend dichteren, aber noch dispersen Partikelphasen verwendet.
- Die aufwendigste Kopplungsvariante, die **Vierwegekopplung** (Fluid \rightarrow Partikel | Partikel \rightarrow Fluid | Partikel \rightarrow Fluid \rightarrow Partikel | Partikel \rightarrow Partikel), erweitert die vorherigen Varianten um die Berechnung von Partikelstößen. Sie ist für sehr dichte, disperse Partikelphasen geeignet.

Die Grundlage einer Lagrange-Simulation bildet die Basset-Boussinesq-Oseen-Gleichung [13, 23, 122]. Die Bewegungsgleichung der Partikel Gl. (4.4) mit der Partikelmasse m_p und der Partikelgeschwindigkeit u_p wird durch Anwendung des zweiten newtonschen Gesetzes gebildet. Die Partikelform wird nachfolgend als ideale Kugel angenommen.

$$m_p \frac{du_{p,i}}{dt} = \sum F_{\text{einzel},i} \quad (4.4)$$

Die rechte Seite der Bewegungsgleichung besteht aus der Summe aller auf die Partikel wirkenden Kräfte. Nach [32] wird zur Beschreibung der Partikelbewegung die relative Geschwindigkeit herangezogen. Neben der Gravitationskraft (unter Berücksichtigung des archimedischen Auftriebsprinzips) mit der Fallbeschleunigung g_i , der Partikeldichte ρ_p , des Partikeldurchmessers d_p und der Dichte der kontinuierlichen Phase ρ

$$F_{g,i} = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho) g_i \quad (4.5)$$

ist die Widerstandskraft

$$F_{d,i} = \frac{\pi}{8} \rho d_p^2 c_{dp} (u_i - u_{p,i}) |\vec{u} - \vec{u}_p| \quad (4.6)$$

eine der wesentlichen Kräfte, die die Partikelbewegung beeinflusst. In Gl. (4.4) ist c_{dp} der Widerstandsbeiwert der Partikel, ρ die Dichte der kontinuierlichen Phase, d_p der Partikeldurchmesser und $(u_i - u_{p,i})$ die Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Phasen. Für die

Bestimmung des Widerstandsbeiwerts wird häufig die Korrelation für kugelförmige Teilchen von SCHILLER und NAUMANN [137] verwendet, wobei dieser je nach Partikelreynoldszahl über

$$c_{dp} = \begin{cases} \left(1 + 0,15 Re_p^{0,687}\right) \frac{24}{Re_p} & \text{für } Re_p \leq 1000 \\ 0,44 & \text{für } Re_p > 1000 \end{cases} \quad (4.7)$$

berechnet wird. Ein weiteres, weit verbreitetes Modell zur Abschätzung des Luftwiderstandskoeffizienten von Partikeln ist das in Gl. (4.8a) aufgeführte Modell von LIU [106]. Um dieses Modell verwenden zu können, muss zusätzlich das Taylor Analogie Breakup Modell aktiviert werden, das die Verformung und Oszillation der Partikel erfasst. Im Vergleich zum Modell von SCHILLER und NAUMANN wird beim Modell von LIU die Verformung der Partikeloberflächen bei der Abschätzung des Luftwiderstandskoeffizienten mitberücksichtigt. Über den Parameter ζ , der ein Maß für die Partikelverzerrung ist, wird zwischen den beiden Extremen Kugel ($\zeta = 0$) und Scheibe ($\zeta = 1$) interpoliert.

$$c_{dp} = (1 + 2,632 \zeta) c_{d,Kugel} \quad \text{mit } \zeta \in [0, 1] \text{ und} \quad (4.8a)$$

$$c_{d,Kugel} = \begin{cases} \left(1 + \frac{1}{6} Re_p^{2/3}\right) \frac{24}{Re_p} & \text{für } Re_p \leq 1000 \\ 0,424 & \text{für } Re_p > 1000 \end{cases} \quad (4.8b)$$

In Regionen mit hohem statischen Druckgradienten $\frac{\partial p_{s,i}}{\partial t}$ in der kontinuierlichen Phase kann die Druckgradientenkraft gemäß Gl. (4.9) einen deutlichen Einfluss auf die Partikel aufweisen.

$$F_{p,i} = -\frac{\pi}{6} d_p^3 \frac{\partial p_{s,i}}{\partial t} \quad (4.9)$$

Weitere Kräfte sind unter anderem die virtuelle Massenkraft aufgrund der Mitbewegung des umliegenden Fluids und die Bassetkraft. Da das Dichteverhältnis $\frac{\rho_p}{\rho}$ in den Untersuchungen groß ist, können diese Kräfte jedoch vernachlässigt werden. In stark turbulenten Strömungen wie einer Fahrzeugumströmung wirken neben den Hauptkomponenten der Geschwindigkeit auch die Geschwindigkeitsfluktuationen auf die Partikel. Dies wird simulativ mit dem stochastischen Ansatz der turbulenten Dispersion berücksichtigt. Details dazu können [61] entnommen werden.

4.4.2 Fluidfilmmodell

Zur Modellierung von dünnen Filmen werden Annahmen getroffen, die die Berechnung deutlich vereinfachen und damit die Simulationszeit verkürzen. Die charakteristische Länge in Höhenrichtung ist wesentlich kleiner als die charakteristische Länge in dazu senkrechter Richtung. Aufgrund der geringen Dicke des Films wird die Strömungsgeschwindigkeit senkrecht zur Filmoberfläche vernachlässigt. Folglich beschreibt das Modell lediglich den Transport in die beiden zur Oberfläche tangentialen Richtungen, weshalb es auch als 2D-Filmmodell bezeichnet wird. In Wandnormalenrichtung wird im Film ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil angenommen und der Film haftet stets an der Wand (siehe Abbildung 4.7). Diese

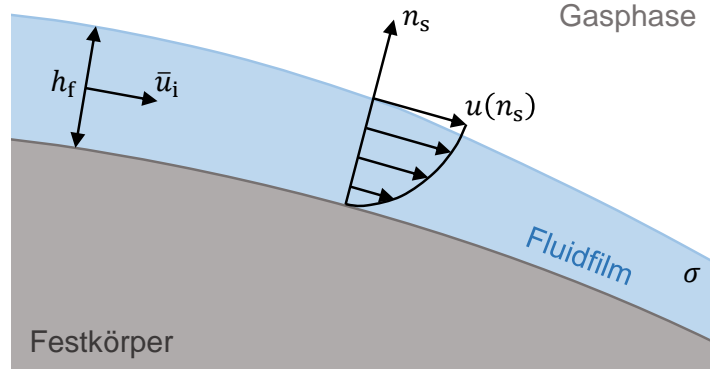


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung des Fluidfilms mit relevanten Parametern

Annahmen gelten näherungsweise für einen dünnen Film und wurden bereits in mehreren Literaturstellen [10, 120, 121, 153] getestet. Unter Berücksichtigung der Filmannahmen werden die dreidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen in ein Gleichungssystem für die Filmdicke sowie die mittleren Geschwindigkeitskomponenten tangential zur Wand hergeleitet. [115]

4.4.2.1 Massenerhaltung

Die Integration der Massenerhaltungsgleichung über die Filmhöhe liefert Gl. (4.10). Darin sind ρ_f die Dichte der Flüssigkeit, h_f die Filmdicke, u_i die Filmgeschwindigkeit und $S_{\rho h}$ der Quellterm der Masse pro Wandflächeneinheit. Der Quellterm berücksichtigt die Änderung durch Impingement, Splashing, Verdampfung, Aufnahme in den Festkörper sowie Filmabriss (vgl. Gl. (4.11)).

$$\frac{\partial \rho_f h_f}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f h_f u_i}{\partial x_i} = S_{\rho h} \quad \text{mit Summation über } i = \{1, 2\} \quad (4.10)$$

$$S_{\rho h} = S_{\rho h, \text{imp}} + S_{\rho h, \text{spl}} + S_{\rho h, \text{vap}} + S_{\rho h, \text{abs}} + S_{\rho h, \text{sep}} \quad (4.11)$$

Der Quellterm für Impingement $S_{\rho h, \text{imp}}$ beschreibt die Akkumulation der Masse pro Fläche und Zeitspanne, die durch auf die Filmregion treffenden Lagrange-Partikel berechnet wird. Der Sourceterm für Splashing $S_{\rho h, \text{spl}}$ ist ähnlich definiert, wobei meist das Modell von BAI [8–10] Anwendung findet. Der durch Verdampfung des Mediums entstehende Massenverlust wird im Quellterm für Verdampfung $S_{\rho h, \text{vap}}$ berücksichtigt. Je nach Feststoff muss gegebenenfalls über den Quellterm der Festkörperaufnahme $S_{\rho h, \text{abs}}$ die zu erwartende absorbierte Menge pro Fläche und Zeiteinheit abgeschätzt werden. Der Quellterm für den Filmabriss $S_{\rho h, \text{sep}}$ berücksichtigt die aus dem Film herausgelösten Lagrange-Partikel, die der Gasphase wieder zugeführt werden. Ein solcher Tropfenverlust tritt beispielsweise an scharfen Kanten auf, denen der Film nicht vollständig folgen kann. [114, 115]

4.4.2.2 Impulserhaltung

Durch Integration der Impulserhaltungsgleichungen in Filmdickenrichtung werden die Gleichungen für die mittleren Filmgeschwindigkeiten hergeleitet, worin u_i die mittleren, tangentialen Geschwindigkeiten des Film, ρ_f die Dichte der Flüssigkeit und h_f die Filmdicke ist. Der Impulsquellterm setzt sich aus einem druckbasierten ($-\frac{\partial p h_f}{\partial x_i}$) und einem spannungsbasierten Anteil ($S_{\rho_{hu},i}$) zusammen.

$$\frac{\partial \rho_f h_f u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f h_f u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p h_f}{\partial x_i} + S_{\rho_{hu},i} \quad \text{mit Summation über } j = \{1, 2\} \quad (4.12)$$

Der Druckanteil besteht aus Kräften in Normalenrichtung, wie Kapillareffekten p_σ , hydrostatischer Druckhöhe p_h , Impingement p_{imp} , Splashing p_{spl} , Verdampfung p_{vap} und lokalem Druck durch die angrenzende Gasphase p_g (vgl. Gl. (4.13a)), während der Spannungsanteil durch viskose Schubspannungen ($\tau_{fg,i}$, $\tau_{fw,i}$) an der Phasengrenze Film-Gas respektive Film-Wand, Gravitationskräfte $\tau_{g,i}$, Formwiderstandskräfte $\tau_{d,i}$ und Kontaktwinkelkräfte tangential zur Oberfläche $\tau_{\theta,i}$ gebildet wird. Zudem fließen Quellterme aufgrund Impingement, Splashing, Verdampfung und Filmabriss in diesen Anteil mit ein (vgl. Gl. (4.13b)).

$$p = p_\sigma + p_h + p_{\text{imp}} + p_{\text{spl}} + p_{\text{vap}} + p_g \quad (4.13a)$$

$$S_{\rho_{hu},i} = \tau_{fg,i} + \tau_{fw,i} + \tau_{g,i} + \tau_{d,i} + \tau_{\theta,i} + S_{\rho_{hu},\text{imp},i} + S_{\rho_{hu},\text{spl},i} + S_{\rho_{hu},\text{vap},i} + S_{\rho_{hu},\text{sep},i} \quad (4.13b)$$

Der Impingementdruck p_{imp} resultiert aus den auf den Film treffenden Lagrange-Partikeln pro Fläche und Zeit multipliziert mit der Geschwindigkeitskomponente normal zur Filmoberfläche, ähnlich bildet sich der Splashingdruck p_{spl} . Der Term p_{vap} beschreibt den Druck der aufgrund des Dampfdruckstoß-Effektes auftritt. Dieser kann bei hohen Verdampfungsraten ziemlich groß sein [82]. Der Druck durch Kapillareffekte p_σ basiert auf Oberflächenspannungen an gekrümmten Filmoberflächen. Der Term p_h erfasst den hydrostatischen Druck senkrecht zur Oberfläche, d. h. er verschwindet an vertikalen Oberflächen. Der letzte Term von Gl. (4.13a) beschreibt den durch die angrenzende Gasphase resultierenden Druck. Die Spannungsanteile durch Schubspannungen an der Film-Wand-Grenze und an der Film-Gasphase-Grenze werden über $\tau_{fw,i}$ und $\tau_{fg,i}$ erfasst. In der Regel ist $\tau_{fw,i} \gg \tau_{fg,i}$. Analog zum hydrostatischen Druck im Druckanteil berücksichtigt $\tau_{g,i}$ den Anteil tangential zur Oberfläche im Spannungsanteil. Dieser wird bei horizontalen Oberflächen zu Null. Entlang der Kontaktlinie, d. h. an der Grenze zwischen benetzter und trockener Oberfläche, wirkt die Kontaktwinkelkraft $\tau_{\theta,i}$. Diese hindert den Film an der Ausbreitung und ist die Hauptursache für teilweise benetzte Oberflächenphänomene. Analog zu den vorherigen Beschreibungen können hier Impulseinflüsse aufgrund von Lagrange-Partikeln ($S_{\rho_{hu},\text{imp},i}$, $S_{\rho_{hu},\text{spl},i}$ und $S_{\rho_{hu},\text{sep},i}$) oder starker Verdampfung $S_{\rho_{hu},\text{vap},i}$ auftreten. [114, 115]

4.4.2.3 Ausgewählte Quellterme

Nachfolgend werden die relevanten Quellterme für die Massen- und Impulserhaltung vorgestellt. Weitere Details zur Gl. (4.10) und Gl. (4.12) können in [114–116] nachgeschlagen werden.

Oberflächenspannungsterme

Der Effekt der Oberflächenspannung an der Phasengrenze zwischen Fluidfilm und Gasphase fließt über zwei Terme in die Impulserhaltungsgleichung (Gl. (4.12)) ein. Die beiden Terme sind der Kapillardruck p_σ und die Kontaktlinienkraft $\tau_{\theta,i}$.

Der Kapillardruck beschreibt den Druck, der durch die Oberflächenspannung als Folge der Krümmung des Films verursacht wird und senkrecht zur Oberfläche wirkt. Wird zur Abschätzung der Krümmung der Filmoberfläche die zweite Ableitung der Filmhöhe verwendet, so lässt sich der Kapillardruck über

$$p_\sigma = -\sigma \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial h_f}{\partial x_i} \right) \quad (4.14)$$

berechnen. Hierin ist σ der Oberflächenspannungskoeffizient und h_f die Filmdicke. Es sei angemerkt, dass die Approximation der Krümmung nur für schwache Krümmungen gilt [94].

$$\tau_{\theta,i} = \beta_\sigma \sigma \frac{1 - \cos(\theta)}{l_{kl}} n_{kl,i} \quad (4.15)$$

Die Kontaktlinienkraft wirkt hingegen tangential zur Oberfläche und ist entscheidend für die korrekte Vorhersage von teilweise benetztem Fließverhalten. Die Kontaktlinienkraft berechnet sich nach Gl. (4.15) mit dem empirischen Skalierungsfaktor β_σ , dem Oberflächenspannungskoeffizient σ , der Zellenlänge in senkrechter Richtung zur Kontaktlinie l_{kl} und dem Kontaktwinkel θ . Diese Kraft pro Fläche (Einheit: N m^{-2}) wird mit dem Einheitsnormalenvektor $n_{kl,i}$ tangential zur Oberfläche und senkrecht zur Kontaktlinie multipliziert, um die Richtungsabhängigkeit korrekt wiederzugeben. [114, 115]

Das empirische Modell zur Berücksichtigung der Oberflächenspannungseffekte ist in einer ähnlichen Form in STAR-CCM+ implementiert. Der Kapillardruck ist dabei um einen Skalierungsfaktor α_σ erweitert und bei der Kontaktlinienkraft wird anstatt dem Einheitsnormalenvektor dividiert durch die Zellenlänge die örtliche Ableitung einer eingeführten Variable verwendet. Der Wert der eingeführten Variable ist Eins, sofern die Filmhöhe eine definierte Mindestfilmdicke übersteigt und die Oberfläche als nass angesehen wird, sonst Null [145]. Damit wird die Kontaktlinienkraft auf unbenetzten Oberflächen deaktiviert.

Schubspannungen

Die beiden Schubspannungsterme τ_{fg} und τ_{fw} wirken an den Phasengrenzen zwischen Film und Gasphase sowie zwischen Film und Wandoberfläche. Aufgrund der geringen Viskosität der Gasphase ist der Schubspannungsterm τ_{fg} in vielen Fällen kleiner als τ_{fw} . Das Geschwindigkeitsprofil innerhalb des Films sei parabolisch und die Geschwindigkeit an der Wand sowie der Geschwindigkeitsgradient an der Phasengrenze zwischen Film und Gasphase seien jeweils

Null. Weiterhin gelte, dass die mittleren Geschwindigkeiten durch Integration in Wandnormalenrichtung und Division durch die Filmdicke bestimmt werden können (Gl. (4.16)). [114, 115]

$$\bar{u}_i = \frac{1}{h_f} \int_0^{h_f} u_i(n_s) dn_s \quad (4.16)$$

Aus den drei Bedingungen kann zunächst das Geschwindigkeitsprofil im Film

$$u_i = \frac{3\bar{u}_i}{h_f} \left(n_s - \frac{n_s^2}{2h_f} \right) \quad (4.17)$$

bestimmt und anschließend die Wandschubspannung aus der allgemeinen Formel für newtonsche Fluide durch Einsetzen des Geschwindigkeitsprofils aus Gl. (4.17) abgeschätzt werden. Darin sind \bar{u}_i die mittleren Filmgeschwindigkeiten, μ die dynamische Viskosität, h_f die Filmdicke und n_s die zur Oberfläche normale Koordinate. Das Vorzeichen in $\tau_{fw,i}$ resultiert aus dem dritten newtonschen Axiom (Actio und Reactio), da hier die auf den Film wirkende Schubspannung gesucht wird.

$$\tau_{fw,i} = -\mu \left. \frac{\partial u_i}{\partial n_s} \right|_{n_s=0} = -\mu \frac{3\bar{u}_i}{h_f} \quad (4.18)$$

Die Annahme eines parabolischen Geschwindigkeitsprofils ist nach [158] ebenfalls für Filme mit Wellenbildung gültig. Die Wellenbildung ist kein hinreichendes Zeichen für einen turbulenten Film. Wie in Abschnitt 3.3 aufgeführt, entstehen bereits im Übergangsbereich vom laminaren zum turbulenten Film Wellen. In diesem Bereich liegt ein pseudolaminarer Film vor. Die kritische Filmreynoldszahl, ab der ein Film vollständig turbulent ist, variiert je nach Literaturstelle. In [6, 26] ist die Bedingung $Re_f > 400$, während in [4] ein Bereich von $Re_f > 400 - 800$ angegeben ist.

Gravitationskräfte

Die Gravitationskräfte tangential zur Oberfläche sind Hauptursache für die Fließbewegung eines Films auf vertikalen oder schiefen Ebenen. An horizontalen Ebenen hingegen verschwindet deren Einfluss. Mit der Fluidichte ρ_f , der Filmdicke h_f sowie den Gravitationskomponenten tangential zur Oberfläche $g_{t,i}$ lassen sich die Gravitationskräfte gemäß Gl. (4.19) bestimmen. [114, 115]

$$\tau_{g,i} = \rho_f h_f g_{t,i} \quad (4.19)$$

Hydrostatischer Druck

$$p_h = -\rho_f h_f (n_i g_i) \quad (4.20)$$

Der hydrostatische Druck ist der Druck, der aus der hydrostatischen Höhe eines ruhenden Fluids resultiert. Er wird über Gl. (4.20) berechnet, worin ρ_f die Fluidichte, g die Gravitationsfeldstärke, n_i der Normalenvektor der Oberfläche und h_f die Filmhöhe ist. Bei Oberflächenvektoren senkrecht zum Gravitationsvektor verschwindet das Skalarprodukt und damit der Einfluss des hydrostatischen Drucks. [114, 115]

Formwiderstandskraft

Die Formwiderstandskraft $\tau_{d,i}$ berücksichtigt die von der Gasphase auf den Fluidfilm ausgeübte Widerstandskraft beim Überströmen der Filmphase. Diese Kraft ist hauptverantwortlich für die Ablenkung eines Rinnals unter Queranströmung und berechnet sich über Gl. (4.21). Der Einfluss des Films auf die angrenzende Strömung bleibt jedoch unberücksichtigt.

$$\tau_{d,i} = \frac{1}{2} \rho c_{df} A_f u_{L,i}^2 \quad (4.21)$$

In der Berechnungsvorschrift zur Formwiderstandskraft $\tau_{d,i}$ ist ρ die Dichte der Luft, c_{df} der Widerstandskoeffizient des Films, A_f die Querschnittsfläche und $u_{L,i}$ die Geschwindigkeit der Gasphase. Der Widerstandskoeffizient des Films kann hierbei angepasst werden, um den Einfluss der Kraft zu schwächen oder zu verstärken. [145]

4.4.3 Volume-of-Fluid-Methode

Das zuvor beschriebene Fluidfilmmodell ermöglicht eine verhältnismäßig schnelle Berechnung der zweiten Phase. Aufgrund der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen ist dieses auf Anwendungsfälle mit einfacher Geometrie begrenzt. Für Detailberechnungen der freien Oberfläche zwischen Wasser- und Luftphase muss die Volume-of-Fluid-Methode (kurz VOF), die auf einem eulerschen Ansatz basiert und erstmals von HIRT und NICHOLS [73] im Jahr 1981 publiziert wurde, genutzt werden. Neben den Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls wird für jede zusätzliche Phase eine Transportgleichung für den Volumenanteil $\alpha_{p^*} = \frac{V_{p^*}}{V_{Zelle}}$ in einer Zelle gelöst. Bei zwei Phasen wird nur eine Gleichung für den Volumenanteil benötigt, da sich der zweite Volumenanteil aus der Bedingung in Gl. (4.22) ergibt.

Die VOF-Methode ist massenerhaltend und zählt zu den Interface-Capturing-Verfahren, die die Bewegung der freien Oberfläche von mehreren nicht mischbaren Phasen auf einem zeitlich unveränderten Netz berechnet. Dabei werden hohe Anforderungen an die zeitliche und räumliche Auflösung gestellt, um die Position und Form der Phasengrenze korrekt abzubilden. Die physikalisch korrekte Darstellung von dispersen Partikeln ist hierbei nur möglich, wenn die Volumenzellen des Netzes wesentlich kleiner als die Partikeldurchmesser sind. Nach [145] werden zur Darstellung mindestens drei Zellen entlang des Durchmessers benötigt, andernfalls ist das Netz ungeeignet. Um die Krümmung eines wandhaftenden Rinnals abzubilden, werden sogar noch mehr Zellen in Dickenrichtung empfohlen.

In jeder Volumenzelle wird ein Volumenanteil mitberechnet. Dieser kann Werte von 0 bis 1 annehmen, wobei die Summe über alle n_{p^*} Phasen in jeder Zelle 1 ergibt (siehe Gl. (4.22)).

$$\sum_{p^*=1}^{n_{p^*}} \alpha_{p^*} = 1 \quad \text{mit } n_{p^*} = \text{Anzahl der Phasen} \quad (4.22)$$

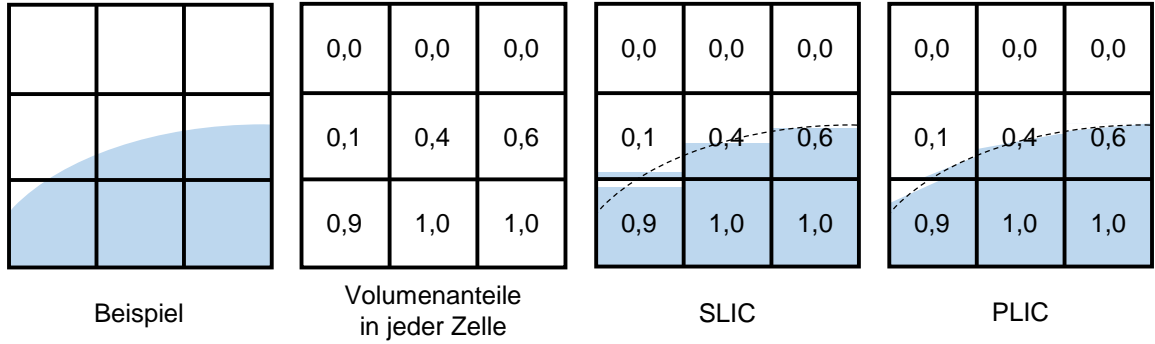


Abbildung 4.8: Zweidimensionales Beispiel zur Rekonstruktion der Phasengrenze anhand des Volumenanteils mittels geometrischer Ansätze

Sofern die Phasengrenze ausreichend fein aufgelöst ist, besitzen die meisten Volumenzellen nur eine Phase. Bei $\alpha_{p^*} = 1$ ist die Zelle vollständig mit der Phase P^* gefüllt, wohingegen die Zelle bei $\alpha_{p^*} = 0$ keinen Anteil der Phase P^* enthält. Alle Zellen mit Werten zwischen 0 und 1 sind teilweise mit der Phase gefüllt und bilden die Phasengrenze. Abbildung 4.8 verdeutlicht den Rückschluss von den Volumenanteilen in den einzelnen Zellen auf die Phasengrenze für ein Interface-Rekonstruktionsverfahren erster Ordnung (Simple Line Interface Calculation, SLIC [119]) mit senkrechten oder parallelen Linien zu den Koordinatenachsen und ein weiteres Interface-Rekonstruktionsverfahren (Piecewise Linear Interface Calculation, PLIC [73, 131]), bei dem die erzeugten Linien eine beliebige Orientierung besitzen. In beiden Fällen teilt die Linie die Volumenzelle derart, dass der Volumenanteil in der Zelle korrekt wiedergegeben wird. Das Interface ist dabei nicht zwingend verbunden [107]. Neben den erwähnten geometrischen Ansätzen der Interfaceberechnung, die häufig auf strukturierte Gitter beschränkt sind, existieren algebraische Ansätze zur Interfaceberechnung. Letztgenannte Ansätze werden in dieser Arbeit verwendet, da sie robust und für unstrukturierte Gitter geeignet sind. Im Gegensatz zu den geometrischen Ansätzen sind hierbei die akkurate Bestimmung der Advektion und die Diffusion an der Phasengrenze die wesentlichen Herausforderungen.

Die Fluideigenschaften einer teilweise gefüllten Zelle werden als Gemisch behandelt und in Abhängigkeit des Volumenanteils über Gl. (4.23a) für die Dichte ρ_{mix} und Gl. (4.23b) die dynamische Viskosität μ_{mix} berechnet.

$$\rho_{\text{mix}} = \sum_{p^*=1}^{n_{p^*}} \alpha_{p^*} \rho_{p^*} \quad \text{bei zwei Phasen: } \rho_{\text{mix}} = \alpha_1 \rho_1 + (1 - \alpha_1) \rho_2 \quad (4.23a)$$

$$\mu_{\text{mix}} = \sum_{p^*=1}^{n_{p^*}} \alpha_{p^*} \mu_{p^*} \quad \text{bei zwei Phasen: } \mu_{\text{mix}} = \alpha_1 \mu_1 + (1 - \alpha_1) \mu_2 \quad (4.23b)$$

Damit lässt sich das resultierende Transportgleichungssystem aus den Gleichungen für die Massenerhaltung (Gl. (4.24a)), die Impulserhaltung (Gl. (4.24b)) und den Volumenanteil (Gl. (4.24c)) wie folgt schreiben: [145]

$$\frac{\partial \rho_{\text{mix}}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{\text{mix}} u_{\text{mix},i}}{\partial x_i} = S_{\rho_{\text{mix}}} \quad (4.24a)$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{mix}} u_{\text{mix},i}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{\text{mix}} u_{\text{mix},i} u_{\text{mix},j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho_{\text{mix}} g_i + F_{\sigma,i} + S_{u_{\text{mix}} \rho_{\text{mix}},i} \quad (4.24b)$$

$$\frac{\partial \alpha_{p^*}}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_{p^*} u_{\text{mix},i}}{\partial x_i} = S_{\alpha_{p^*}} \quad (4.24c)$$

Darin ist $u_{\text{mix},i}$ die Geschwindigkeit des Gemischs, τ_{ij} der die Viskosität beinhaltende Spannungstensor, $F_{\sigma,i}$ der Vektor der Oberflächenspannungskräfte und $S_{\rho_{\text{mix}}}$, $S_{u_{\text{mix}} \rho_{\text{mix}},i}$ sowie $S_{\alpha_{p^*}}$ sind Quellterme für Masse, Impuls und Volumenanteil. Die Kräfte aufgrund der Oberflächenspannung $F_{\sigma,i}$, die die Fluidmoleküle der freien Oberfläche mit den restlichen Fluidmolekülen zusammenhalten, werden mit dem Continuum Surface Force Ansatz nach [24] auf die Zellen in Nähe der Phasengrenze übertragen. Die Oberflächenspannungskraft kann in einen tangentialen und normalen Anteil aufgeteilt werden. Im Fall eines konstanten Oberflächenspannungskoeffizienten σ , wie er in dieser Arbeit vorliegt, verschwindet der tangentielle Anteil der Kraft. Die für den normalen Anteil benötigte Krümmung der freien Oberfläche wird dabei aus dem Feld des Volumenanteils berechnet.

In Wandnähe wird zusätzlich der Einfluss des Kontaktwinkels auf die Krümmung der freien Oberfläche berücksichtigt. Die VOF-Methode ist in der Lage, sowohl mit konstanten als auch mit dynamischen Kontaktwinkeln zu rechnen. Bei Anwendung eines dynamischen Kontaktwinkelmodells wie beispielsweise dem Kistler-Modell [88] wird die Kenntnis der Kontaktliniengeschwindigkeit benötigt, da der Kontaktwinkel von der Geschwindigkeit der Dreiphasenlinie abhängt. Hierbei wird zwischen dem fortschreitendem und dem rückschreitenden Kontaktwinkel unterschieden (vgl. Abschnitt 3.4). In dem in STAR-CCM+ umgesetzten Modell wird die Geschwindigkeit der Kontaktlinie mit der Relativgeschwindigkeit zwischen der wandnächsten Zelle und der Wand abgeschätzt. In [105] werden weiterentwickelte Modelle vorgestellt, die sogar den Pinning-Effekt numerisch abbilden können. Liegt der sich einstellende Kontaktwinkel innerhalb der Kontaktwinkelhysterese, wird die Kontaktliniengeschwindigkeit gleich der Wandgeschwindigkeit gesetzt, liegt er außerhalb der Hysterese, wird die Kontaktliniengeschwindigkeit gleich der Fluidgeschwindigkeit der wandnächsten Zelle gesetzt.

Die größte Schwierigkeit bei der VOF-Methode ist die korrekte Lösung der Transportgleichung für den Volumenanteil. Bedingt durch Diskretisierungsfehler kann der berechnete Volumenanteil den physikalischen Gültigkeitsbereich von 0 bis 1 verlassen und scharfe Sprünge können durch numerische Diffusion verschmieren. MUZAFERIJA und PERIĆ entwickelten das High-Resolution-Interface-Capturing-Verfahren (kurz HRIC-Verfahren) [118], das die Erfassung einer scharfen Phasengrenze basierend auf normalisierten Variablen (siehe Normalized Variable Diagram [99]) ermöglicht. Ferner berücksichtigt das HRIC-Verfahren die Beschränkung des Volumenanteils auf den gültigen Bereich, reduziert Gitterabhängigkeiten und minimiert die numerische Diffusion. Unabhängig davon wird ein qualitativ hochwertiges Netz, das die freie Oberfläche korrekt erfassen kann, benötigt, um akkurate Lösungen mit VOF-Simulationen zu erhalten. Die Phasengrenze wird beim HRIC-Verfahren nicht explizit rekonstruiert, wodurch

der Aufwand bei der Bestimmung der Phasengrenze im dreidimensionalen Raum reduziert wird [53]. Für weitere Details zum High-Resolution-Interface-Capturing-Verfahren wird auf [164] verwiesen.

Das HRIC-Verfahren mit Akkuratessse zweiter Ordnung ist grundsätzlich an die Bedingung $CFL < 1$ geknüpft und wechselt bei Missachtung der Bedingung aus Stabilitätsgründen in ein Aufwindverfahren erster Ordnung (Upwind Difference Scheme). Dies kann zu einer irreversiblen Verschmierung der Phasengrenze führen. Ein zusätzliches Modell zur Schärfung der Phasengrenze ist das zeitliche Zwischenschrittverfahren bei der Lösung der Transportgleichung für den Volumenanteil. Dieses Verfahren teilt den aktuellen Zeitschritt in mehrere, äquidistante Subzeitschritte, sodass die CFL-Zahl stets einen vorgegebenen Zielwert annimmt. Durch dieses Verfahren kann der Zeitschritt größer gewählt werden, da die CFL-Bedingung durch zeitliche Subzyklen eingehalten wird. Bei geeigneter Wahl des Zeitschritts und der Einstellungen des zeitlichen Zwischenschrittverfahrens kann die Rechenzeit bei gleichzeitiger Erhaltung einer scharfen Phasengrenze deutlich reduziert werden. Näheres ist [110, 145] zu entnehmen.

In letzter Zeit wurden bereits einige Verbesserungen zur Optimierung der Ergebnisgüte oder Reduktion der Rechenzeit von Mehrphasensimulationen durchgeführt. Zudem wird die Simulationssoftware kontinuierlich weiterentwickelt. Nennenswert ist hierbei die adaptive Netzverfeinerung, bei der das Rechennetz während der Simulation bedarfsgerecht verfeinert wird (siehe z. B. [130]). Dieses Verfahren ist ab Version 2020.1 von STAR-CCM+ verfügbar, wobei es bisher nicht in Kombination mit dem Filmmodell anwendbar ist.

4.4.4 Hybrides Fluidfilm-Volume-of-Fluid-Mehrphasenmodell

Beim hybriden Fluidfilm-VOF-Mehrphasenmodell werden das Filmmodell und die Volume-of-Fluid-Methode miteinander gekoppelt. Das Ziel ist die Kombination der Vorteile beider Ansätze und die Reduktion der Rechenkosten. Das Filmmodell berechnet für jede Oberflächenzelle die Filmhöhe und -geschwindigkeit, wobei die berechnete Filmhöhe die umliegende Strömung nicht beeinflusst. Aufgrund der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen ist das Modell auf dünne Filme beschränkt und versagt bei stark dreidimensionalen Phänomenen, wie sie beispielsweise beim Übergang von Hindernissen auftreten können. Die Volume-of-Fluid-Methode ist in der Lage, Flüssigkeitsphasen mit einer sehr hohen Genauigkeit zu bestimmen, sofern die zeitliche und räumliche Diskretisierung fein genug ist. Dabei besteht eine Zweiwege-Kopplung, wodurch die Flüssigkeitsphase einen Einfluss auf die Luftphase aufweist und umgekehrt. Nachteilig bei dieser Methode ist, dass die Rechenkosten bedingt durch die feine Auflösung schnell ansteigen und eine Berechnung mit heutigen Rechnerressourcen nicht mehr in angemessener Zeit möglich ist. Folglich wird das hybride Modell so angewendet, dass auf großen, ebenen Flächen mit dem Filmmodell und an Hindernissen, wo dreidimensionale Phänomene nicht vernachlässigt werden können, mit der VOF-Methode gerechnet wird. Der Übergang zwischen beiden Ansätzen erfolgt automatisch und ist direkt abhängig vom gesamten Wasservolumenanteil in der Zelle, d. h. der Summe des Anteils durch Film und des Anteils durch VOF. Dazu wird für jedes Interface, auf dem ein Film auftreten kann, eine Grenze für den Wasservolumenanteil $\alpha_{\text{trans}} \in [0, 1]$ definiert. In jedem Zeitschritt wird der aktuell vorliegende Wasservolumenanteil einer Zelle

$$\alpha_{\text{Zelle}} = \frac{V_{\text{VOF}} + V_{\text{Film}}}{V_{\text{Zelle}}} \quad (4.25)$$

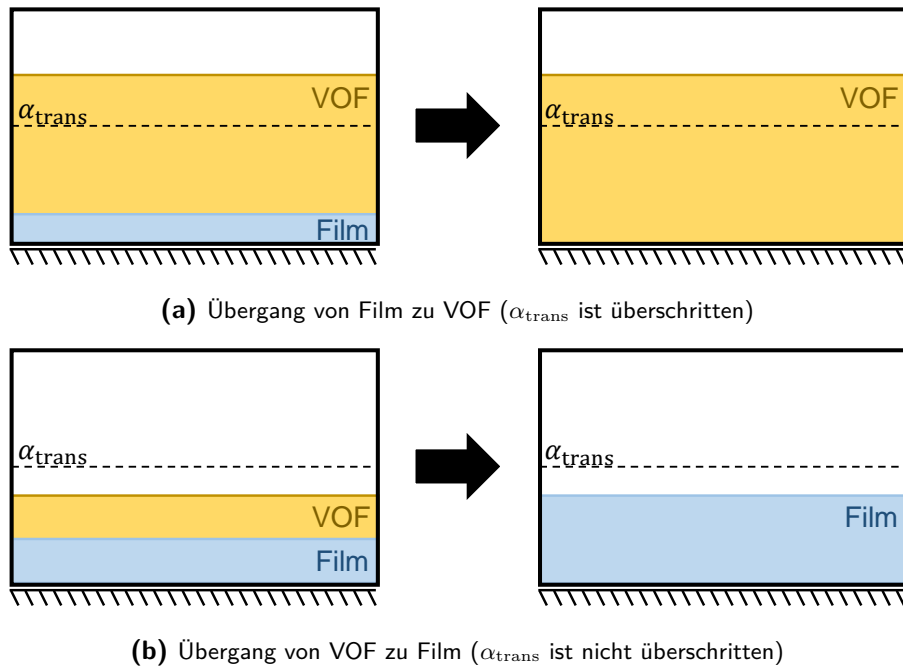


Abbildung 4.9: Schematische Skizze zum hybriden Fluidfilm-VOF-Mehrphasenmodell (nach [145])

mit α_{trans} verglichen. Hierin ist V_{VOF} das Volumen der VOF-Wasserphase, V_{Film} das Volumen des Fluidfilms und V_{Zelle} das Zellvolumen. Ist der Wasservolumenanteil einer Zelle größer als die definierte Grenze, dann wird mit der VOF-Methode gerechnet, ist dieser kleiner als die definierte Grenze, wird das Filmmodell verwendet. Eine schematische Darstellung liefert Abbildung 4.9. Auf der linken Seite des Schemas ist jeweils eine Zelle mit Wasservolumenanteilen aufgrund von VOF und von Film und auf der rechten Seite die beiden möglichen Folgen. In Abbildung 4.9a übersteigt die Summe der Wasseranteile die Grenze α_{trans} und es wird mit der VOF Methode weitergerechnet, während in Abbildung 4.9b die Grenze α_{trans} unterschritten wird und demnach mit dem Filmmodell weitergerechnet wird. Beide Anteile der Wassermassen werden in den resultierenden Anteil für den jeweiligen Ansatz überführt. [145] Neben der direkten Abhängigkeit der Wahl des Filmmodells oder der VOF-Methode vom eingestellten Wert α_{trans} besteht ein indirekter Zusammenhang zur Zellgröße, da mit kleinerem Zellvolumen, der Wasservolumenanteil schneller steigt und damit α_{trans} schneller erreicht wird.

4.5 Darstellung von Netzbewegungen

In vielen praktischen Fällen bewegt sich ein Teil der Baugruppe, wodurch die Erhaltungsgleichungen zur Berechnung des Strömungsfeldes nicht mehr auf einem statischen Netz gelöst werden. Die Bewegung kann durch Fluid-Struktur-Interaktionen hervorgerufen werden, wobei das Fluid einen festen Körper verschiebt oder einen flexiblen Körper verformt (z. B. Verformung einer Membran oder Öffnung von Klappen durch Anströmung), oder durch definierte, von außen aufgeprägte Bewegungen (z. B. Rotation der Räder eines fahrenden Fahrzeugs oder Öffnen des Schiebedachs). Um solche Fälle dynamisch zu simulieren, sind Netzbewegungen notwendig.

Einfache, rein translatorische oder rotatorische Bewegungen, bei denen die ursprüngliche Netzform lokal unverändert bleibt, können mithilfe einer Festkörperbewegung simuliert werden. Die Simulationsregion wird dabei in unbewegte und bewegte Netzregionen aufgeteilt. Die beiden Regionen sind über ein Interface miteinander verbunden, das eine exakt definierte, translations- bzw. rotationssymmetrische Oberfläche darstellt. Die Rotation der Räder eines Fahrzeugs (bestehend aus Felge, Felgenstern und Radanschlussfläche) wird zum Beispiel mit dieser Methode abgebildet. Daneben existiert ein Ansatz, der mit bewegten Bezugssystemen arbeitet und damit ohne eine tatsächliche Netzbewegung auskommt. Der Ansatz des bewegten Bezugssystems ist weniger rechenintensiv und kann stationär gerechnet werden. Hierbei werden die Erhaltungsgleichungen für ein bewegtes Bezugssystem umgeschrieben und gelöst. Nachteilig ist jedoch die statische Geometrie, deren Ursprungsposition und -orientierung das Ergebnis beeinflussen kann. Der Ansatz ist auch als Multiple/Moving Reference Frame bekannt und findet häufig Anwendung bei axial durchströmten Lüftern.

Bei komplexeren Bewegungen müssen andere Verfahren in der Simulation eingesetzt werden, da sich die ursprüngliche Netzform bei der Bewegung verändern kann. Hierzu werden drei Ansätze sowie die jeweiligen Vor- und Nachteile aufgeführt:

- Netzverformung (Morphing)
- Neuvernetzung (Remeshing)
- Overset-Mesh-Ansatz (Chimera-Gitter)

In [64] werden die drei Techniken beschrieben und auf Literaturstellen zu relevanten Studien verwiesen. Abbildung 4.10 stellt die verschiedenen Ansätze an einem zweidimensionalen Problem dar.

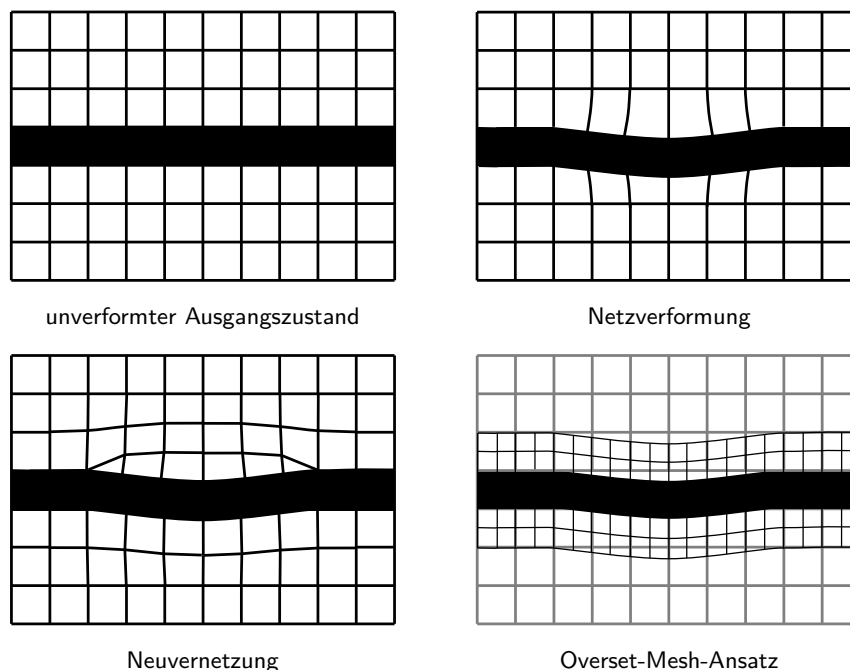


Abbildung 4.10: Ansätze zur Darstellung von Netzbewegungen

4.5.1 Netzverformung

Beim Ansatz der Netzverformung (Morphing) wird das Netz um den bewegten Körper in jedem Zeitschritt verformt, um die gewünschte Bewegung abzubilden. Dabei bleibt sowohl die Anzahl der Zellen als auch die Topologie des Netzes erhalten. Eine Interpolation zwischen verschiedenen Rechnernetzen ist nicht notwendig. Nachteilig bei der Netzverformung ist, dass nur kleine Bewegungen umgesetzt werden können. Da die Volumenzellen bei der Abbildung der Bewegung verformt werden, können Zellen mit großer Verzerrung bzw. Stauchung entstehen. Dadurch kann die Netzqualität lokal so weit abnehmen (insbesondere große Seitenverhältnisse der Zellen und negative Volumina), dass die gesamte Berechnung abbricht. [64, 72]

4.5.2 Neuvernetzung

Beim Ansatz der Neuvernetzung (Remeshing) wird die Gesamtregion oder nur ein lokaler Bereich nahe des bewegten Körpers regelmäßig und zu definierten Zeitpunkten neu vernetzt. Durch die Neuvernetzung kann die Netzqualität wiederhergestellt werden. Dadurch werden größere Bewegungen ermöglicht. Nachteilig ist jedoch der erhöhte Zeit- und Rechenbedarf für die mehrfache Vernetzung sowie für die Interpolation der bisherigen Lösung auf das neue Netz. Um den Vernetzungsaufwand während der Berechnung zu reduzieren, besteht die Möglichkeit, bereits vorgefertigte Netze für Verformungszustände in die Simulationsdatei zu laden. Die Interpolation der Strömungsgrößen auf das neue Netz lässt sich allerdings nicht umgehen. Ferner werden die Erhaltungsgleichungen während des Interpolationsvorgangs zum Teil verletzt. [64]

In einigen Fällen ist eine Kombination von Netzverformung und Neuvernetzung aussichtsreicher als die reine Verwendung eines einzigen Ansatzes. Dazu wird das Netz zunächst für eine definierte Anzahl an Zeitschritten oder bis die Netzqualität eine bestimmte Grenze unterschreitet verformt (Netzverformung), anschließend wird die Region neu vernetzt (Neuvernetzung) und die Strömungsgrößen werden auf das neue Netz interpoliert. Dieser Prozess wird so lange wiederholt bis die zu simulierende Bewegung abgeschlossen ist. Durch die Kombination der beiden Ansätze werden zwei Probleme der Einzelansätze gelöst. Zum einen können größere Bewegungen als bei der reinen Netzverformung realisiert werden und zum anderen wird der Vernetzungsaufwand im Vergleich zur reinen Neuvernetzung reduziert. [72]

4.5.3 Overset-Mesh-Ansatz

Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Ansätzen liegen beim Overset-Mesh-Ansatz bzw. Ansatz mit Chimera-Gittern zwei separate Netzregionen (Overset-Region und Hintergrundregion) übereinander. Sie wurde ursprünglich zur kontrollierten Vernetzung einer komplexen Geometrie herangezogen, die mit den konventionellen Ansätzen zur damaligen Zeit nicht in hoher Qualität vernetzt werden konnte [154]. Die Overset-Region (schwarzes Netz des Chimera-Gitters in Abbildung 4.10, Zellen zur besseren Veranschaulichung kleiner dargestellt) beinhaltet den bewegten Körper und ist meist nicht wesentlich größer als dieser. Diese Region bewegt sich innerhalb der statischen Hintergrundregion (graues Netz des Chimera-Gitters in Abbildung 4.10). Am Interface zwischen der Overset-Region und der Hintergrundregion werden

die Strömungsgrößen interpoliert, um einen Informationsaustausch zwischen den beiden Regionen zu ermöglichen. Dazu ist eine Mindestanzahl an überlappenden Gitterzellen notwendig. Im Gegensatz zur Neuvernetzung, bei der die Interpolation im gesamten Simulationsgebiet durchgeführt wird, findet die Interpolation beim Overset-Mesh-Ansatz nur lokal am Interface statt, wodurch der Rechenaufwand geringer ist. Nachteilig an diesem Ansatz der Netzbewegung ist der komplizierte Aufbau einer Simulation und die Tatsache, dass die Erhaltung von Größen (insbesondere der Masse) am Interface nicht zwingend erfüllt wird. Um die Interpolationsfehler klein zu halten, sollten die Zellen der überlappenden Bereiche möglichst ähnlich sein und die Interfacegrenzen idealerweise in Bereichen mit geringen Gradienten liegen. Die Vorteile des Overset-Mesh-Ansatzes sind, dass während der Berechnung keine Neuvernetzung erforderlich ist und dass die Netzqualität der beiden Regionen im Allgemeinen hoch ist. [64]

Lösungsablauf beim Overset-Mesh-Ansatz

Die Overset-Region umschließt einen (bewegten) Körper und liegt innerhalb der größeren Hintergrundregion. Die Strömungslösung wird zeitgleich mit einem einzelnen Gleichungssystem für beide Regionen berechnet (strong inter-grid coupling). Im Vergleich zur separaten Lösung (weak inter-grid coupling) verbessert sich die Konvergenz und die Genauigkeit bei vergleichbarem Rechenaufwand. [64] An der Berandung der Overset-Region findet die Interpolation der Strömungsgrößen von den Spender- auf die Empfängerzellen und damit der Informationsaustausch der beiden Netze statt. Spenderzellen sind aktive Zellen, die nahe an den Empfängerzellen der anderen Netzregion liegen und Ihre Lösung auf diese übertragen. Je nach verwendetem Interpolationsschema

- abstandsgewichtete Interpolation
- lineare Interpolation und lineare quasi-zweidimensionale Interpolation
- Methode der kleinsten Quadrate

werden mehr oder weniger teils gewichtete Spenderzellen benötigt. Bei der abstandsgewichteten Interpolation werden drei (für 2D) und vier (für 3D) Spenderzellen pro Empfängerzelle benötigt und die Interpolationsfaktoren sind antiproportional zum Abstand zwischen den Zellknotenpunkten von Spender und Empfänger. Bei der linearen Interpolation werden von den Zellknotenpunkten der Spenderzellen Dreiecke in 2D und Tetraeder in 3D aufgespannt (vgl. Abbildung 4.11). Die Methode wird besonders bei bewegten Netzen empfohlen, weil die Interpolationsmuster hierbei nicht überlappen und Empfängerzellknotenpunkte von einem Interpolationsmuster in das nächste wandern. Dieses Interpolationsverfahren ist aufwendiger und genauer als die abstandsgewichtete Interpolation. Ein Sonderfall stellt die lineare quasi-zweidimensionale Interpolation dar, die bei dreidimensionalen Netzen mit nur einer Zellschicht zum Einsatz kommt. Bei der Methode der kleinsten Quadrate erhält die Empfängerzelle Informationen von der nächst gelegenen Spenderzelle sowie den umliegenden Spenderzellen, die sich mit ihr mindestens einen Knoten teilen. In Interpolationsbereichen mit hohen Gradienten ist die lineare Interpolation zu bevorzugen, da Interpolationsverfahren höherer Ordnung zu Instabilitäten oder Schwingungen in der Lösung führen können. Die Berechnung der Interpolation von abhängigen Variable erfolgt nach der Routine in Gl. (4.26). Hierin sind w_i die Gewichtungsfaktoren der Interpolation, Φ_A die abhängige Variable der Empfängerzelle und Φ_i die abhängige Variable in den jeweiligen zur Interpolation herangezogenen Spenderzellen. [145]

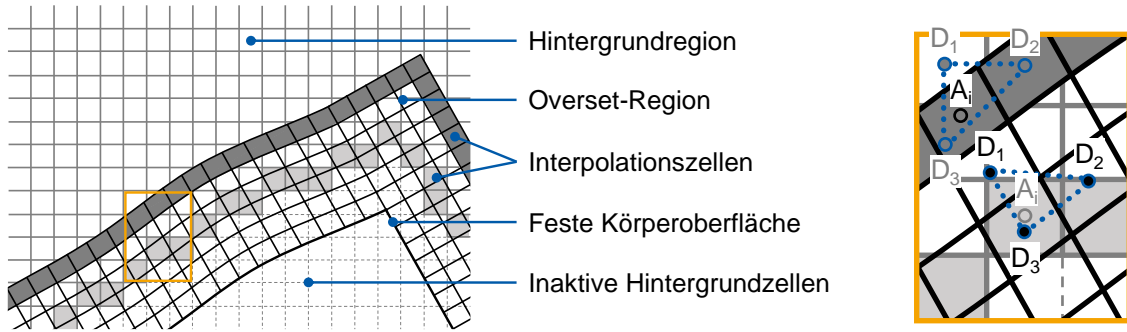


Abbildung 4.11: Überlappungsbereich von Overset-Region (schwarze Gitterlinien) und Hintergrundregion (graue Gitterlinien) mit aktiven/inaktiven Zellen und Interpolationszellen sowie Interpolationsschema mit Spenderzellen (D) und Empfängerzellen (A) (in Anlehnung an [64, 72])

$$\Phi_A = \sum_{i=1}^{n_D} w_i \Phi_i \quad \text{mit } n_D = \text{Anzahl der Spenderzellen} \quad (4.26)$$

Einige Zellen der Hintergrundregion, die von der Overset-Region überlappt werden, werden zur Berechnung des aktuellen Zeitschritts nicht benötigt und daher temporär inaktiv geschaltet. Sollten diese Zellen in den darauffolgenden Zeitschritten aufgrund der Bewegung der Overset-Region wieder in das zu berechnende Strömungsgebiet gelangen, können diese erneut aktiviert und andere Zellen, die nun nicht mehr relevant sind, deaktiviert werden. Die Zellen nahe der Grenzfläche zwischen Overset-Region und Hintergrundregion nehmen verschiedene Zustände an:

- inaktiv (an der Berechnung nicht beteiligt)
- aktiv (an der Berechnung beteiligt)
- Interpolationszellen

In Abhängigkeit der Ordnung des verwendeten Zeitintegrationsverfahrens werden zur Berechnung in jeder Zelle die Werte des letzten und teilweise zusätzlich des vorletzten Zeitschritts benötigt. Bei der Wahl des Zeitschritts einer Simulation mit bewegter Overset-Region ist darauf zu achten, dass beim Wechsel von aktiven zu inaktiven Zellen (und andersherum) der Zustand als Interpolationszelle nicht übersprungen wird. Für ein Zeitintegrationsverfahren erster Ordnung muss die Bewegung pro Zeitschritt kleiner als die kleinste Zelllänge im Überlappungsbereich und für ein Verfahren zweiter Ordnung sogar kleiner als die halbe Zelllänge sein [64, 72].

Die wesentlichen Schritte einer Overset-Mesh-Simulation mit bewegten Körpern sind in Abbildung 4.12 in Form eines Flussdiagramms abgebildet. Zunächst werden die überlappenden Regionen geladen und in Abhängigkeit der Priorität zu einer Gesamtregion verknüpft, die mit der vorgegebenen Startlösung initialisiert wird. Bei unbewegten Körpern muss die Berechnung der Interpolationsdaten nur einmal zu Beginn der Simulation durchgeführt werden, während diese bei bewegten Körpern in jedem Zeitschritt aktualisiert werden. Die anschließende Lösung der Transportgleichungen erfolgt analog zur Berechnung auf einem einzigen Gitter. Die neue Position des Körpers wird in jedem Zeitschritt aktualisiert, wobei die Bewegung entweder

vorgegeben oder als Resultat einer Fluid-Struktur-Interaktion berechnet wird. Die Zeitschleife wird dabei solange durchlaufen bis der letzte Zeitschritt erreicht oder ein Stoppkriterium erfüllt ist.

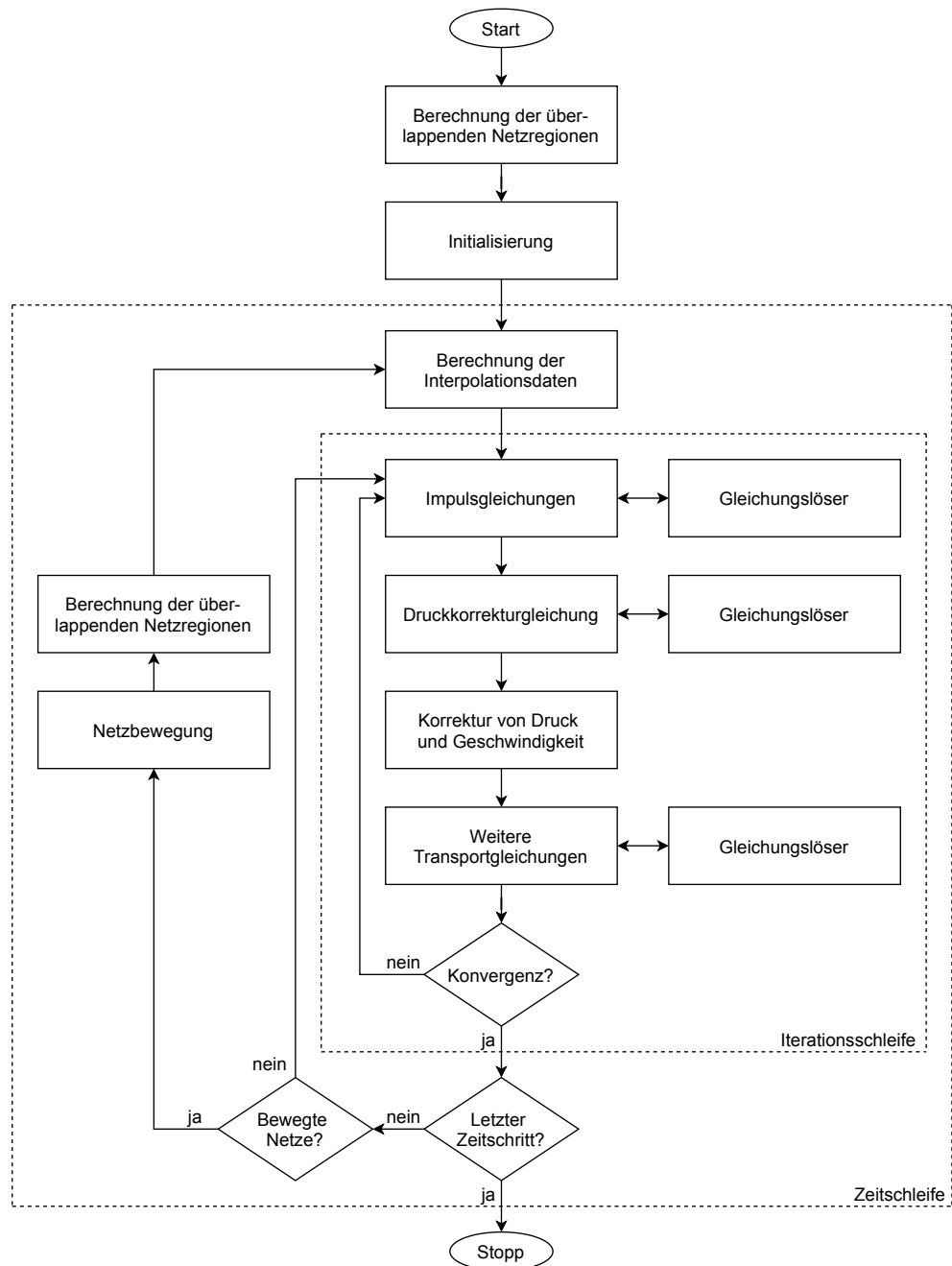


Abbildung 4.12: Flussdiagramm zur Strömungsberechnung von überlappenden (und bewegten) Gittern

4.6 Übersicht der durchgeführten Simulationsfälle

Mit Blick auf die kommenden Kapitel werden an dieser Stelle die typische Rechenzeit für eine physikalische Sekunde und die Anzahl der Volumenzellen für die verschiedenen Simulationsfälle zusammengefasst. Eine Übersicht ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Der Aufbau der Aerodynamiksimulation orientiert sich an [35, 84] und ist in Abschnitt 5.1 näher beschrieben.

Tabelle 4.1: Übersicht zu Anzahl der Volumenzellen und benötigte Rechenzeit für eine physikalische Sekunde der verschiedenen Simulationsfälle

Simulationsfall	Luftanströmung	Volumenzellen	Rechenzeit für 1 s	Quer- verweis
Detaillierte Aerodynamiksimulation am gesamten Fahrzeug	80 km h ⁻¹	99,5 · 10 ⁶	20 000 CPUh	Abschnitt 5.1
Grundlagensimulation zum Benchmark des Filmmodells	8 m s ⁻¹	1,5 · 10 ⁶	500 CPUh	Abschnitt 5.2
Testfall mit bewegtem Schieber für Parameterstudien	0 m s ⁻¹	1,1 · 10 ⁶	750 CPUh	Abschnitt 5.3
Aerodynamiksimulation im Fahrzeugausschnitt	80 km h ⁻¹	15,8 · 10 ⁶	4500 CPUh	Abschnitt 5.4
Reduzierte Aerodynamiksimulation mit Scheibenwischerbewegung am gesamten Fahrzeug	80 km h ⁻¹	50,0 · 10 ⁶	20 500 CPUh	Abschnitt 6.3
Scheibenwischersimulation mit Wasseraustrittskörper	10 m s ⁻¹	27,8 · 10 ⁶	59 000 CPUh	Abschnitt 6.4
Simulation der Sichtfreihaltung im UWK	120 km h ⁻¹	14,9 · 10 ⁶	66 000 CPUh	Abschnitt 7.3

Sofern in den jeweilig verlinkten Abschnitten nichts anderes erwähnt wird, wird zur Berechnung der Strömungsgrößen eine Improved Delayed Detached Eddy Simulation (IDDES) [143, 157] mit dem k - ω -SST-Turbulenzmodell nach MENTER [113] verwendet. Das k - ω -SST-Turbulenzmodell gehört zu den Wirbelviskositätsmodellen mit zwei zusätzlichen Gleichungen für die turbulente, kinetische Energie k und die Dissipationsfrequenz ω . Es stellt einen Zusammenschluss aus dem k - ω -Turbulenzmodell für wandnahe Bereiche und dem k - ε -Turbulenzmodell für wandferne Bereiche dar. Eine Detached Eddy Simulation (DES) vereint im Allgemeinen eine Grobstruktursimulation (LES – Large Eddy Simulation) mit einer Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Rechnung (RANS – Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Die Idee

liegt in der Kombination der Vorteile beider Verfahren: Die hohe Genauigkeit einer LES mit der Geschwindigkeit einer RANS-Rechnung. In Wandnähe wird mit den RANS-Gleichungen gerechnet und in der wandfernen, freien Strömung wird die LES genutzt. Der Wechsel zwischen den Verfahren erfolgt in Abhängigkeit vom Wandabstand und der lokalen Volumenzellgröße. Im Gegensatz zur DES wird bei einer Delayed Detached Eddy Simulation DDES der Wechsel von RANS zur LES verzögert, indem weitere Strömungsgrößen bei der Wechselbedingung mitbezogen werden. Die IDDES erweitert eine DDES um den Ansatz einer wandmodellierten Grobstruktursimulation. Der Wechsel wird hierbei anhand der Strömungstopologie und der Gitterauflösung umgesetzt. [143]

In diesem Kapitel werden die Voruntersuchungen zur Modellierung der komplexen Scheibenwischerbewegung zusammengefasst. Zunächst wird überprüft, inwieweit eine CFD-Simulation die realen Strömungsverhältnisse auf der Seitenscheibe vorhersagen kann. Dazu wird die Grenzschicht an ausgewählten Punkten der Seitenscheibe mit Windkanalmessungen im AEROLAB gegenübergestellt. Im nächsten Abschnitt wird ein Benchmark des reinen Filmmodells an einem vom Fahrzeug abgeleiteten Grundlagenversuch durchgeführt (vgl. Abbildung 3.7). Dabei werden die Benetzungsmuster des generischen Versuchs mit denen der zugehörigen Simulation verglichen und Verbesserungsmöglichkeiten zur Annäherung an die Experimente erarbeitet und vorgestellt. Anschließend werden die in numerischen Parameterstudien gewonnenen Erkenntnisse an einem Testfall zusammengetragen, der die wesentlichen Merkmale einer Scheibenwischersimulation erfasst. Zuletzt werden die Strömungsverhältnisse einer Gesamtfahrzeugsimulation mit denen von verschiedenen Ausschnittsimulationen abgeglichen.

5.1 Strömungscharakteristik nahe Seitenscheibe und A-Säule

Um dem Kunden ein möglichst angenehmes Fahrgefühl während Regen zu ermöglichen, betreiben Fahrzeughersteller einen hohen Entwicklungsaufwand zur Optimierung der Sichtfreihaltung. Da auf der Seitenscheibe im Gegensatz zur Windschutzscheibe keine Scheibenwischer vorhanden sind, muss über andere Maßnahmen sichergestellt werden, dass die Sicht durch die Seitenscheibe – insbesondere durch das Sichtfenster auf den Außenspiegel – möglichst wenig beeinträchtigt wird. Zur Erfüllung der Sichtfreihaltungsziele ist eine genaue Kenntnis der Strömung um die A-Säule und auf der Seitenscheibe nötig, die das Fließverhalten der Flüssigkeit mitbestimmt.

5.1.1 Strömungscharakteristik nahe der Seitenscheibe

Vergleich der Grenzschichtprofile auf der Seitenscheibe

Um zuverlässige Vorhersagen zum EWM treffen zu können, ist die Kenntnis der Strömungsverhältnisse nahe der Fahrzeugoberfläche entscheidend. Aus diesem Grund werden die Strömungsverhältnisse auf der Seitenscheibe einer BMW 3er Limousine der sechsten Generation (BMW F30) mittels der Hitzdrahtanemometrie (Konstant-Temperatur-Anemometrie) im AEROLAB der BMW Group charakterisiert. Dabei wird ein eindrähtiger Hitzdraht gewählt, da dieser sehr nahe an der Fahrzeugoberfläche positioniert werden kann. Die Ergebnisse werden mit CFD-Berechnungen abgeglichen. Die Hitzdrahtanemometrie stellt ein weitverbreitetes

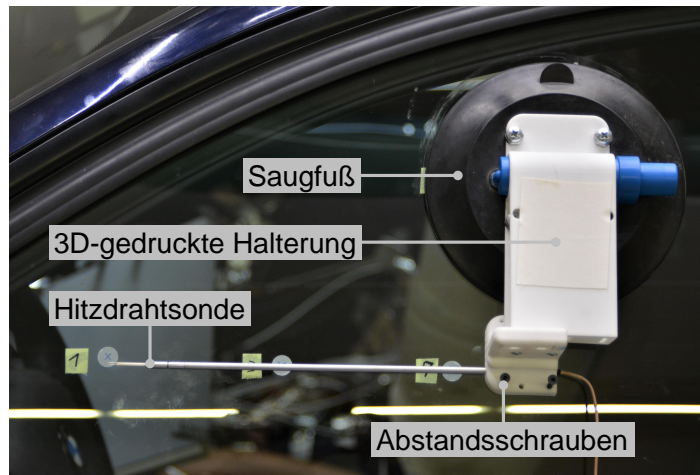


Abbildung 5.1: Befestigung der Hitzdrahtsonde mit einem Saugfuß an der Seitenscheibe

Verfahren zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten dar. Sie ist aufgrund des hohen räumlichen und zeitlichen Auflösungsvermögens besonders für Strömungsgebiete mit großen Schwankungsgrößen geeignet. Während einer Messung wird der dünne Draht auf konstanter Übertemperatur zur Umgebung gehalten. In Abhängigkeit des Wärmeübergangs durch erzwungene Konvektion wird zur Temperatúraufrechterhaltung mehr oder weniger Strom benötigt. Durch vorherige Kalibrierung des Hitzdrahtes lässt sich der benötigte Strom in eine Strömungsgeschwindigkeit umrechnen. Die Hitzdrahtsonde wird im Experiment mit einem Saugfuß und einer 3D-gedruckten Halterung auf der Seitenscheibe des Fahrzeugs befestigt. Über zwei Schrauben lässt sich der Abstand zwischen Hitzdraht und Seitenscheibe definiert einstellen, wobei die Hitzdrahthalterung stets vorgespannt ist, um ein Abheben von der Seitenscheibe unter Windlast zu verhindern (vgl. Abbildung 5.1).

Die händisch verstellbare Konstruktion besitzt im Gegensatz zu einer elektrisch verfahrbaren (Mini-)Traverse einerseits den Vorteil des geringeren Gewichts, das bei einer Befestigung an der Scheibe auf das Bauteil wirkt, und andererseits bietet diese Variante eine kleinere Windangriffsfläche, sodass ein Aufstau der Strömung bis hin zur Hitzdrahtsonde ausgeschlossen werden kann. Nachteilig ist jedoch die manuelle Änderung des Abstands zur Seitenscheibe, die eine Unterbrechung des Windkanals zwischen den einzelnen Messungen erfordert. Eine Liste der verwendeten Messtechnik ist nachfolgend aufgeführt:

- DANTEC StreamLine Pro System
- Langer Probenhalter DANTEC 55H21
- Hitzdraht DANTEC 55P11
- Kurzschlusssonde DANTEC 55H30
- 20 m BNC Kabel
- Saugfuß MANFROTTO 241
- 3D-gedruckte Hitzdrahthalterung

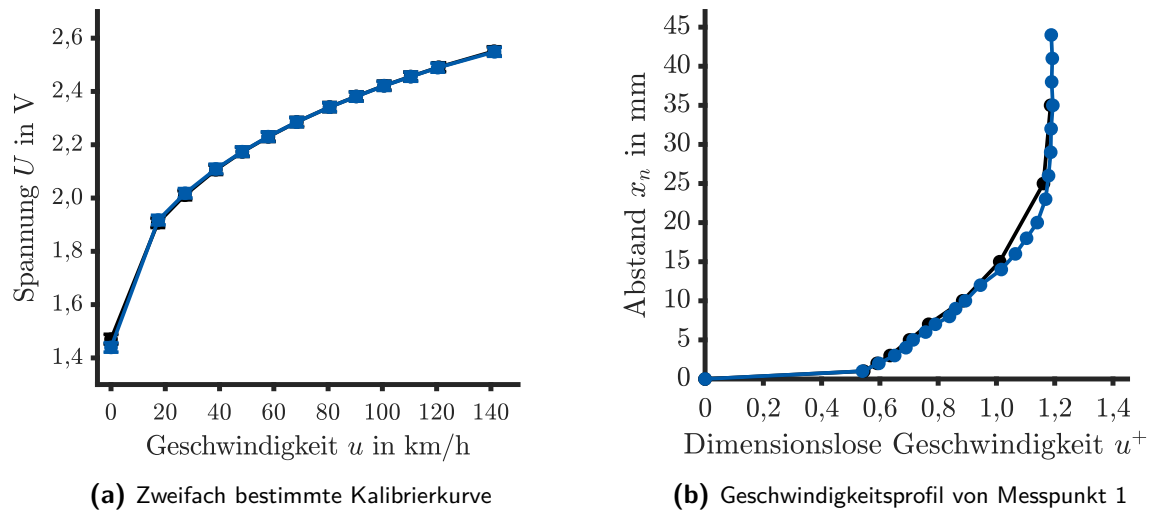


Abbildung 5.2: Vor und nach den Messungen bestimmte Kalibrierkurve der Hitzdrahtsonde (links) und Geschwindigkeitsprofil von Messpunkt 1 mit unterschiedlichen Abtastungen des wandnormalen Abstands (rechts)

Die Kalibration des Hitzdrahtes wird im Freistrahls des Windkanals durchgeführt. Dazu werden neben der Nullmessung verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten aufgezeichnet, um eine Beziehung zwischen gemessener Hitzdrahtspannung und Geschwindigkeit aufzustellen. Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten sowie die Kalibrierkurve sind in Abbildung 5.2a dargestellt. Zur Kontrolle, ob der Hitzdraht während der Messungen verschmutzt oder beschädigt wird, wird am Ende der Messkampagne eine erneute Kalibration durchgeführt. Die Kalibrationskurven vor und nach den eigentlichen Messungen sind – wie in Abbildung 5.2a zu sehen – deckungsgleich, weshalb eine Verschmutzung bzw. Beschädigung der Hitzdrahtsonde ausgeschlossen werden kann. Im relevanten Geschwindigkeitsbereich ist die maximale Abweichung zwischen den beiden berechneten Kalibrierkurve kleiner als 0,6 %.

Während der eigentlichen Messung wird der Windkanal mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 80 km h^{-1} betrieben. An neun Punkten auf der Seitenscheibe wird das Geschwindigkeitsprofil senkrecht zur Scheibe bestimmt. Durch Wahl des Koordinatensystems im rechten, unteren Eckpunkt der Scheibe (vgl. Abbildung 5.8) lassen sich die Messpunkte gemäß Tabelle 5.1 definieren, wobei jeweils im Abstand von 1 mm, 2 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm, 10 mm, 15 mm, 25 mm und 35 mm zur Seitenscheibe gemessen wird. Messpunkt 1 wird zusätzlich in einer feineren Abstufung vermessen (siehe Abbildung 5.2b). Vor Umwandlung der Anemometerspannungen in Geschwindigkeiten werden die gemessenen Werte einer Temperaturkompensation unterzogen, um mögliche Temperaturänderungen während einer Messung und Abweichungen

Tabelle 5.1: Definition der Messpunkte auf der Seitenscheibe

Messpunkt-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x -Koordinate in mm	-450	-350	-350	-450	-550	-550	-350	-650	-450
z -Koordinate in mm	150	50	150	50	50	150	250	50	230

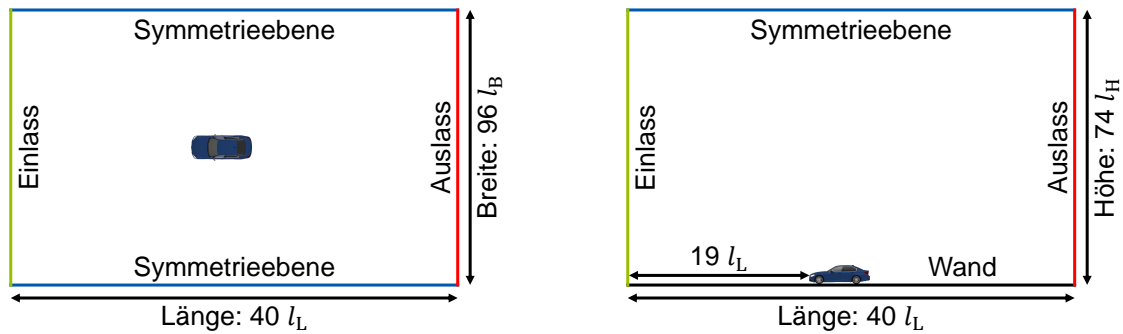


Abbildung 5.3: Abmessungen und Randbedingungen des numerischen Simulationsgebiets in der Draufsicht (links) und der Seitenansicht (rechts), nicht maßstabsgetreu

zur Kalibriertemperatur zu korrigieren. Voraussetzung hierzu ist die Erfassung der Fluidtemperatur während der Messungen. Die genutzte Temperaturkompensation basiert auf dem Verfahren von PESSONI und CHAO [124].

Für die simulativen Untersuchungen wird das Versuchsfahrzeug realitätsnah abgebildet. Die wesentlichen Komponenten des Fahrzeugs (insbesondere Karosserie, Fahrwerk, Antriebsstrang und Motorraum) bleiben beim Geometrieaufbereitungsprozess erhalten. Das Simulationsvolumen besteht aus einem Quader mit den Abmaßen 40 Fahrzeuglängen, 96 Fahrzeugbreiten und 74 Fahrzeughöhen, wobei sich das Fahrzeug 19 Fahrzeuglängen stromabwärts des Einlasses befindet (vgl. Abbildung 5.3). Blockierungseffekte durch das Fahrzeug können bei diesen Dimensionen ausgeschlossen werden. Der fahrzeugnahe Bodenbereich ist analog zum Einbandsystem des Windkanals unterteilt und ermöglicht so eine straßenähnliche Bodensimulation. Der fahrzeugferne Bodenbereich ist reibungsfrei. Die Decke sowie die seitlichen Wände sind als Symmetrieebenen definiert. Das Simulationsvolumen ist primär mit Hexaederzellen vernetzt, die in Hauptströmungsrichtung orientiert sind und zum Fahrzeug hin stufenweise kleiner werden. Die drei fahrzeugnächsten Auflösungsregionen sind im Gegensatz zu den quaderförmigen, fahrzeugfernen Auflösungsregionen gemäß der Fahrzeugaußenhaut geformt (siehe Abbildung 5.4). In direkter Fahrzeugnähe besitzen die Volumenzellen eine Kantenlänge von 8 mm , die jedoch lokal in einzelnen Bereichen, wie z. B. im Auswertebereich nahe der A-Säule und der Seitenscheibe oder in den Regionen der Wärmetauscher, unterschritten wird. Die Fahrzeugoberfläche wird durch mehrere Schichten von prismatischen Zellen diskretisiert, um einerseits die Zellorientierung entlang der Oberfläche sicherzustellen und andererseits einen dimensionslosen Wandabstand kleiner als Eins zu realisieren. Rotierende Komponenten wie Felgen, Lüfter oder durchströmte Bremscheiben befinden sich jeweils in einer eigenen Region, um die Drehung abbilden zu können. Diese Regionen werden an der Wand mit Prismenschichten und wandfern mit Polyederzellen vernetzt, um eine hohe Zellqualität zu erzielen. Die Wärmetauscher liegen ebenfalls in eigenen Regionen und werden als poröse Medien behandelt, für die der experimentell ermittelte Druckverlust vorgegeben wird. Die Vernetzung erfolgt mit entlang der Strömungsrichtung orientierten Hexaederzellen. Insgesamt besteht das Simulationsvolumen aus etwa $99,5$ Millionen Volumenzellen, wovon $10,1$ Millionen Zellen für die rotierenden Bauteile und die Wärmetauscher verwendet werden.

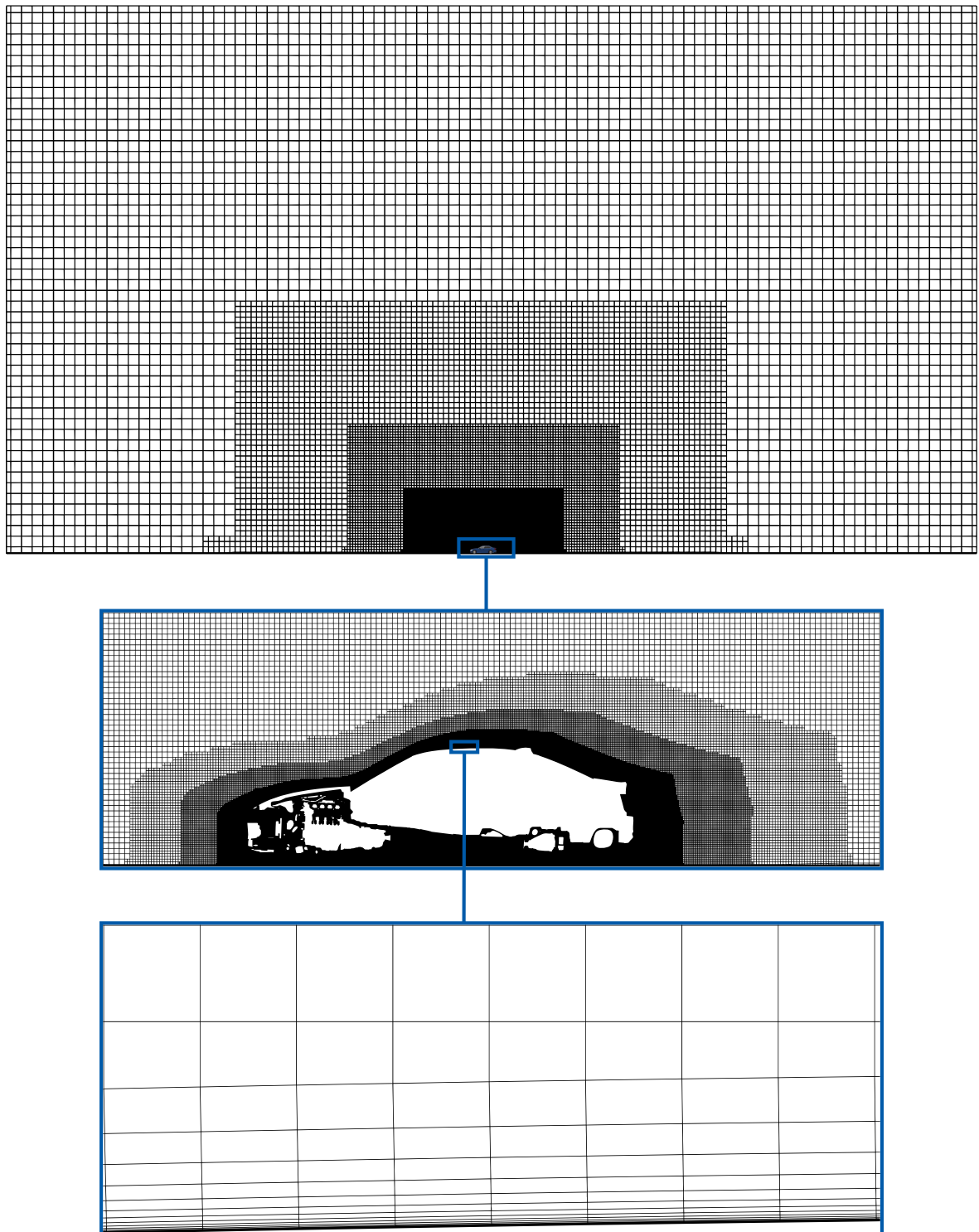


Abbildung 5.4: Räumliche Diskretisierung von Versuchsfahrzeug und Simulationsvolumen in der Mittelschnittebene

Die an neun Stellen auf der Seitenscheibe gemessenen Grenzschichtprofile werden nachfolgend mit der Simulation verglichen. Im Versuch wird der Hitzdraht stets parallel zur Scheibenoberfläche orientiert, um an jeder Stelle des Drahtes den gleichen Abstand zur Scheibe zu haben. Der eindrähtige Hitzdraht erfasst die (positive) Geschwindigkeitsmagnitude in Querrichtung des Drahtes und ohne weitere Richtungsinformation. Um die Strömungsfeldgrößen entlang einer zur Seitenscheibe senkrechten Linie aus der Simulation zu extrahieren, wird ein Skript geschrieben, da dies kein standardmäßiger Auswerteprozess des CFD-Programms ist und mehrere Schritte nacheinander durchzuführen sind. Für den Vergleich mit der Messung wird aus den einzelnen Geschwindigkeitskomponenten der Simulation in Abhängigkeit der Orientierung der Seitenscheibe im jeweiligen Messpunkt die Geschwindigkeitsmagnitude in Querrichtung des Drahtes berechnet. Dabei fließen alle Geschwindigkeitskomponenten mit ein, wobei die Komponente in x -Richtung aufgrund des größten Betrags den wesentlichen Beitrag liefert. Die resultierenden Grenzschichtprofile auf der vorderen, linken Seitenscheibe sind in Abbildung 5.5 für die Hitzdrahtmessungen und die durchgeführte Simulation bis zu einem Wandabstand von 40 mm abgebildet. Auf der Abzisse ist jeweils die dimensionslose Geschwindigkeit u^+ und auf der Ordinate der Abstand senkrecht zur Seitenscheibe x_n in mm aufgetragen. Die Messergebnisse sind in schwarz und die Simulationsergebnisse in blau dargestellt.

Die Messpunkte 6, 7, 8 und 9 liegen direkt hinter einer zurückspringenden Stufe und sind extrem schwer simulativ abzubilden. Der Punkt 8 liegt im Rezirkulationsgebiet hinter dem rund 10 mm hohen Absatz des Spiegeldreiecks. Trotz der Herausforderungen bei der Berechnung zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment, zumal der Fokus hier auf einem sehr kleinen Detailbereich einer umfangreichen Gesamtfahrzeugsimulation liegt. Bei den Messpunkten 1 und 3 stimmt zwar der wandnahe und der wandferne Bereich überein, allerdings ist die Krümmung dazwischen in der Simulation bauchiger. Die Kurvenverläufe zu den Punkten 2, 4 und 5 sind hingegen gleich. Zu diesem Stand sind bereits viele Iterationen zur Erzeugung einer höheren Übereinstimmung durchgeführt worden: Die Wandgrenzschicht wird vollständig aufgelöst ($y^+ < 1$) und mit der IDDES und dem k - ω -SST-Turbulenzmodell wird bereits ein sehr aufwendiges Berechnungsverfahren angewandt.

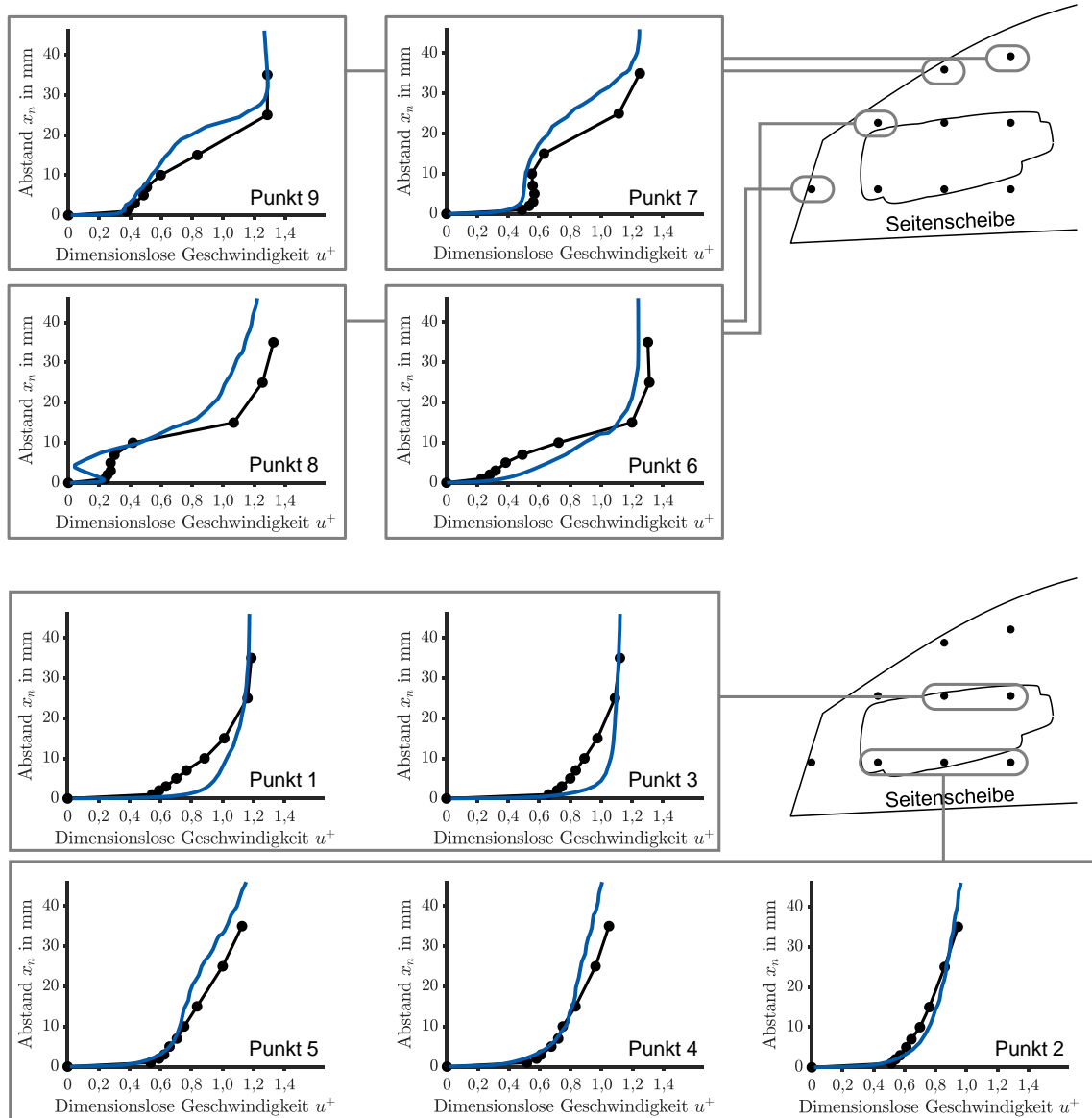


Abbildung 5.5: Grenzschichtprofile von Messung (schwarz) und Simulation mit vereinfachter A-Säulengeometrie (blau)

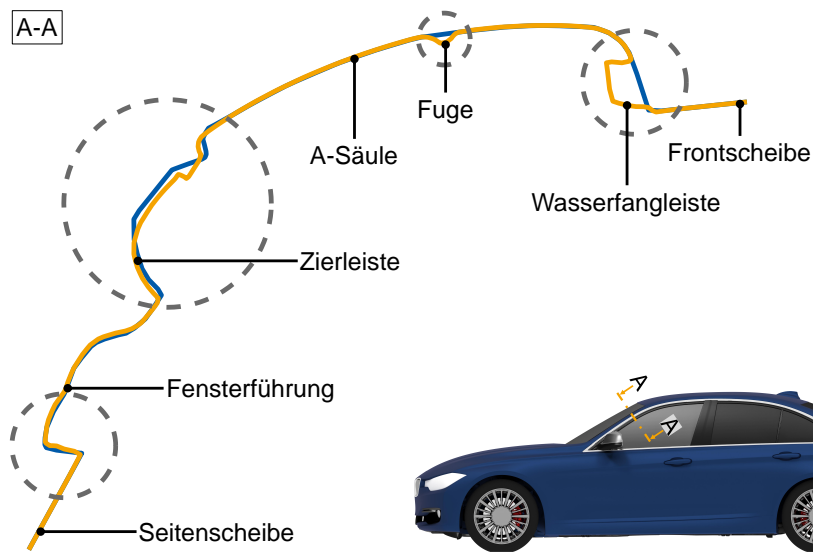


Abbildung 5.6: Querschnitt der vereinfachten (blaue Kontur) und der detaillierten (orange Kontur) A-Säule

Eine Änderung, die eine weitere Verbesserung bewirkt, ist die Erhöhung des Detaillierungsgrades der A-Säulengeometrie mit Wasserfangleiste, Dichtungen sowie weiteren Kanten und Spalten. Dazu wird die gesamte A-Säulengeometrie erneut aufbereitet und vernetzt, wobei sämtliche Details erhalten bleiben. Abbildung 5.6 zeigt den Querschnitt der vereinfachten (blaue Kontur) und der detaillierten A-Säule (orange Kontur). Die wesentlichen Unterschiede sind mit Kreisen markiert. Im Vergleich zur detaillierten Geometrie ist bei der Vereinfachung die Wasserfangleiste geschlossen. Zusätzlich unterscheiden sich die beiden Varianten durch den Schließungsgrad der Nut und den Übergang zur Seitenscheibe. Trotz der doch eher kleineren Abweichungen in der Geometrie haben diese Unterschiede einen Einfluss auf die Strömungseigenschaften nahe der Seitenscheibe. Durch die Erhöhung des Detaillierungsgrades der A-Säule rücken die Kurven der Geschwindigkeitsprofile von Experiment und Simulation näher aneinander.

Abbildung 5.7 zeigt die Messergebnisse in schwarz und die Simulationsergebnisse mit detaillierter A-Säule in orange. Die Geschwindigkeitsprofile zu den von Stufen entfernten Messpunkten (1, 2, 3, 4 und 5) sind nun sehr ähnlich. Die Punkte direkt hinter der Fensterführung stimmen vom Kurvenverlauf und dem Absolutniveau gut überein. Lediglich die Messstellen 7 und 8 weichen noch leicht von der Messung ab. Die Abweichung bei Punkt 8 ist mit der im Vergleich zur Fensterführung noch höheren Stufe am Spiegeldreieck und der Verortung des Messpunktes im Rezirkulationsgebiet zu begründen. Für Messungen in rezirkulierenden Strömungen wird ferner eine gepulste Hitzdrahtmesstechnik empfohlen [156], weshalb der Fehler in diesem Punkt nicht nur in der Simulation zu suchen ist. Bei der Simulation mit detaillierten A-Säulengeometrie zeigt sich im Vergleich zur vereinfachten A-Säule insgesamt eine deutliche Verbesserung in den vorhergesagten Werten, da die Intensität des A-Säulenwirbels sowie der Ablöse- und Wiederanlegepunkt, die sensitiv auf Änderungen in der Gestalt der A-Säule reagieren, besser getroffen werden (siehe Abschnitt 5.1.2). Zur genauen Bestimmung

der Strömungsverhältnisse nahe einer Oberfläche wird folglich eine sehr detaillierte Geometrie benötigt, die in frühen Entwicklungsphasen eines Automobils allerdings nur selten bis nicht vorliegt.

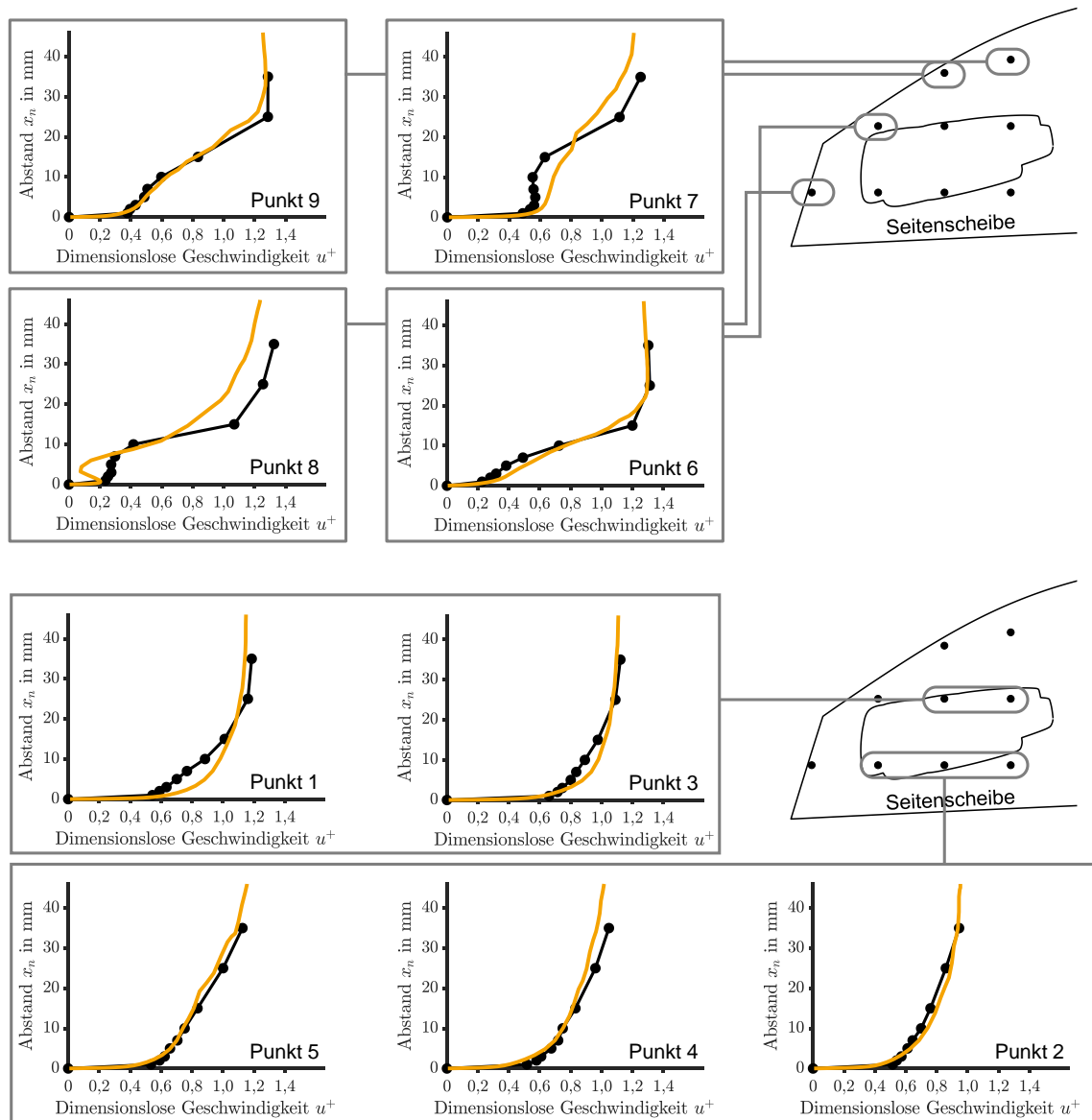


Abbildung 5.7: Grenzschichtprofile von Messung (schwarz) und Simulation mit detaillierter A-Säulengeometrie (orange)

Vergleich der Strömungsrichtung nahe der Seitenscheibe

Um mit dem Hitzdraht möglichst nah an der Seitenscheibe zu messen, wird eine Eindrahtsonde verwendet. Im Vergleich zu einer X-Drahtsonde oder einer Dreidrahtsonde wird hingegen die Strömungsrichtung nicht erfasst. Zusätzliche Informationen zur Strömungsrichtung werden durch auf die Seitenscheibe geklebte Fädchen in einem separaten Versuch bestimmt. Dazu werden im äquidistanten Abstand von 50 mm auf acht horizontalen und 15 vertikalen Linien

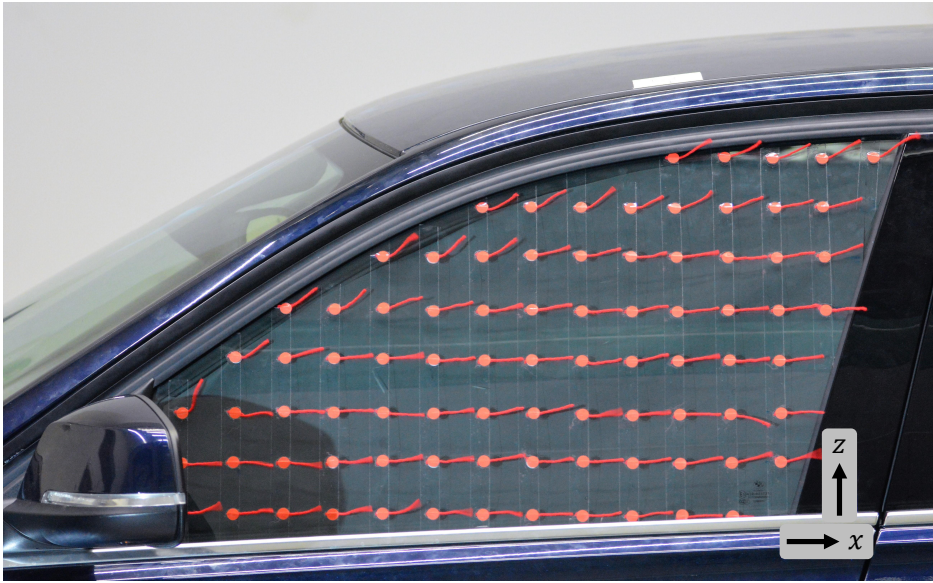


Abbildung 5.8: Fäden auf der Seitenscheibe der BMW 3er Limousine bei einer Anströmgeschwindigkeit von 80 km h^{-1}

Fäden angebracht, die sich bei Luftanströmung entlang der Stromlinien orientieren. Abbildung 5.8 zeigt die Verteilung der aufgeklebten Fäden auf der Seitenscheibe bei einer Anströmungsgeschwindigkeit von 80 km h^{-1} . Neben der Momentaufnahme wird ein Video aufgenommen, das die instationäre Bewegung der Fäden aufzeigt. Dieses Video wird hinsichtlich der maximalen Bewegungsfächer jedes Fädchens ausgewertet.

Das aufgenommene Video wird in Einzelbilder zerlegt und mit einer Bildauswertesoftware analysiert. Für jedes Einzelbild wird der rote Faden detektiert und in einem separaten Bild gespeichert. Aus der Überlagerung der Extraktionen ergibt sich ein Fächer, der den Bewegungsraum des Fädchens kennzeichnet. Die resultierende Strömungsrichtung wird durch Winkelbestimmung zwischen dem Fadenende und der Horizontalen bestimmt, da das Fadenende im Gegensatz zum durch die Klebung fixierten Fadenanfang der Strömung besser folgen kann. In der Simulation werden die Geschwindigkeitsgrößen in einem Abstand von 2 mm zur Seitenscheibe extrahiert, da die Geschwindigkeit auf der Seitenscheibe gemäß der Haftbedingung Null ist und die Fäden eine gewisse Dicke aufweisen. Aufgrund der Diskretisierung müssen die Feldgrößen dafür interpoliert werden, um für jedes Fädchen im Experiment einen vergleichbaren Richtungsvektor in vorgegebenem Abstand zur Seitenscheibe zu erhalten. Die so ermittelten Strömungsrichtungen und Bewegungszonen der Fäden werden in Abbildung 5.9 mit den aus der Simulation erhaltenen Ergebnissen gegenübergestellt.

Der Vergleich zwischen Experiment und Simulation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Die Strömungsrichtungen werden an fast allen Positionen korrekt vorhergesagt. Lediglich die stark turbulenten Bereiche mit hoher Fadenbewegung (d. h. einem großen Bewegungsfächer) zeigen vereinzelt Abweichungen auf. Die Positionen mit den größten Abweichungen befinden sich unmittelbar hinter dem Spiegeldreieck bzw. der Fensterführung um die Seitenscheibe. Diese Bereiche sind bedingt durch die Geometrie (zurückspringende Stufe) nur schwer simulativ zu erfassen. Die Strömung löst hier stellenweise ab. Insbesondere die exakte Bestimmung

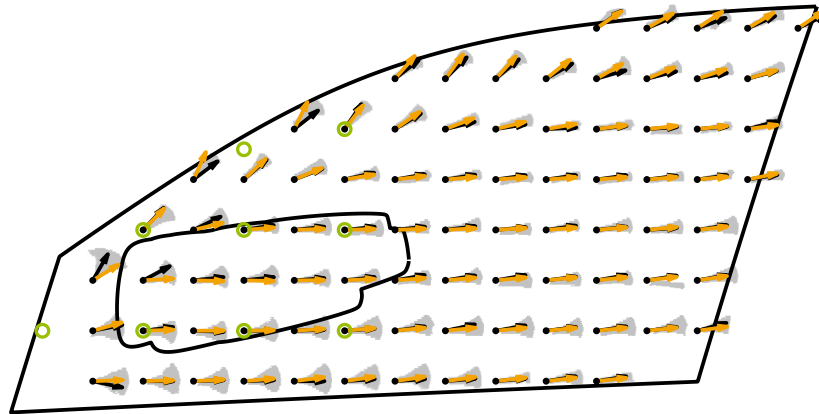


Abbildung 5.9: Strömungsrichtung nahe der Seitenscheibe des Experiments (schwarze Vektoren) und der detaillierten Simulation (orange Vektoren) inklusive Bewegungsfächer der Fädchen (graue Bereiche) sowie Messpunkte der Grenzschichtprofile (grüne Kreise)

der Wiederanlegelänge der Strömung stellt eine Herausforderung dar. Nichtsdestotrotz ist die Übereinstimmung in Anbetracht der hohen Komplexität insgesamt sehr gut und alle Strömungsrichtungsvektoren liegen innerhalb des jeweiligen Bewegungsfächers.

5.1.2 Strömung um die A-Säule

Die Strömung um die A-Säule ist in der Literatur bereits analysiert, weshalb an dieser ausgewählte Literaturquellen aufgeführt und keine eigenen Messungen durchgeführt werden. Die charakteristischen Phänomene werden von den Simulationen gut abgebildet. Aufgrund der Neigung der Windschutzscheibe kommt es an der A-Säule eines Fahrzeuges zur Strömungsablösung in Form eines dreidimensionalen Tütenwirbels (vgl. Abbildung 5.10). Die Intensität des Längswirbels sowie die Ablöse- und Wiederanlegelinie sind dabei abhängig von der Gestaltung der A-Säule (z. B. mit oder ohne Wasserfangleiste, Kanten und Radii) [77]. In [127, 132] wird der Einfluss verschiedener Winkel zwischen Windschutzscheibe, Seitenscheibe

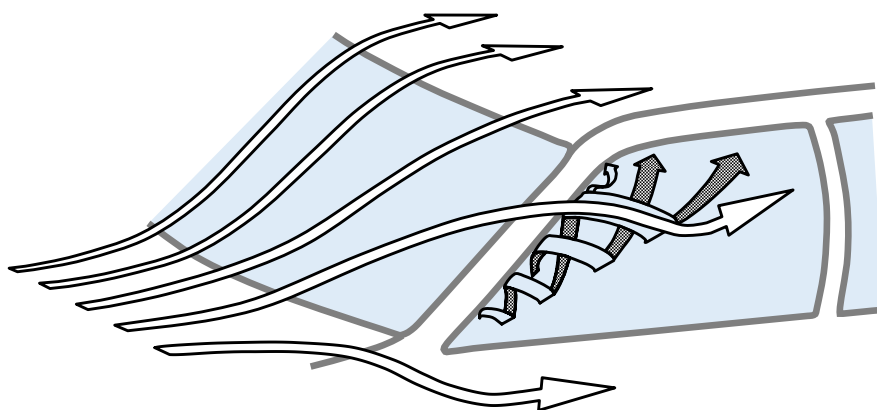


Abbildung 5.10: Schematische Darstellung der Strömung um die A-Säule (nach [76])

und Motorhaube auf die Strömungsablösung und die Wirbelbildung untersucht. Das primäre Ziel ist die Reduktion der Geräusche in der Fahrgastzelle, da diese ab einer Geschwindigkeit von 100 km h^{-1} im Wesentlichen durch die Interaktion zwischen dem A-Säulenwirbel und der vorderen Seitenscheibe verursacht werden. Die akustikoptimale Variante mit einem sehr flachen Windschutzscheibenwinkel und einem großen A-Säulenradius verringert die Strömungsablösung und die Wirbelbildung, ist jedoch aufgrund der Einschränkung des Kopf- und Schulterraums nicht für Serienfahrzeuge geeignet. Weiterhin zeigt sich in [45, 68] die Bedeutung des Gierwinkels auf die Umströmung der A-Säule. Durch Variation des Gierwinkels ändert sich die Ausprägung des A-Säulenwirbels und damit der Oberflächendruck auf der Seitenscheibe. Bereits bei moderaten Gierwinkeln von 15° ist die turbulente Intensität deutlich erhöht und fällt kaum ab mit Erhöhung des Abstandes zur Seitenscheibe [3]. Dies ist eine interessante Erkenntnis, zumal die Anströmung eines bewegten Fahrzeuges auf der Straße aufgrund von Wind oder Beeinflussung durch vorausfahrende Verkehrsteilnehmer stets unter einem gewissen Winkel zur Längsachse stattfindet.

Experimentelle Untersuchungen zur Strömung um die A-Säule werden von LEVY in mehreren Veröffentlichungen [100–102] beschrieben. Er zeigt, dass sich der A-Säulenwirbel aus einem primären und einem sekundären Wirbel zusammensetzt, die entgegengesetzt rotieren. Durch PIV-Messungen in acht Ebenen entlang der A-Säule wird die Bewegung der Wirbelzentren beobachtet. Während sich das Wirbelzentrum des primären Wirbels linear von der Seitenwand wegbewegt, bleibt das Zentrum des sekundären Wirbels auf einer Bahnkurve parallel zur Seitenwand. Zudem wird die starke Interaktion des A-Säulenwirbels mit der Seitenscheibe herausgestellt. Besonders innerhalb des A-Säulenwirbels treten große Druckfluktuationen auf, deren Intensität auf die Seitenscheibe mit zunehmendem Verlauf entlang der A-Säule abnimmt. Diese Tatsache lässt sich mit der zuvor beschriebenen Entfernung von der Seitenscheibe begründen.

Da die A-Säulenform den Luftwiderstand, die Windgeräusche in der Fahrgastzelle und den Wasserabtransport beeinflusst, sind bei der Gestaltung unterschiedliche und teils gegenläufige Aspekte zu berücksichtigen. In Bezug zur Sichtfreihaltung wird insbesondere versucht, möglichst viel Regenwasser entlang der A-Säule nach unten in Richtung Windlauf oder über das Dach abzutransportieren, sodass die vordere Seitenscheibe möglichst unbenetzt bleibt. Der mit negativen Effekten wie Widerstands- oder Geräuscherhöhung verbundene A-Säulenwirbel kann den Abtransport fördern, indem von der A-Säule tropfendes Wasser mitgerissen wird.

5.2 Benchmark des Filmmodells anhand von Grundlagenversuchen

Das in Abschnitt 4.4.2 beschriebene Filmmodell ist im Vergleich zur Volume-of-Fluid-Methode aufgrund der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen sowie einer gröberen Auflösung des Simulationsvolumens weniger rechenzeitintensiv. Es stellt sich hingegen die Frage, ob die Akkurateesse für den Anwendungsfall ausreichend ist. Der nachfolgende Abschnitt analysiert den Stand des in STAR-CCM+ Version 2019.1 implementierten Filmmodells hinsichtlich der Simulationsgüte am Beispiel eines vom Fahrzeug abgeleiteten Grundlagenexperiments (vgl. Abbildung 3.7). Während der Untersuchung werden erarbeitete Verbesserungen wie die Vorgabe eines Kontaktwinkelteppichs auf der Oberfläche umgesetzt und beim qualitativen und

quantitativen Vergleich berücksichtigt. Die experimentell aufgenommenen Benetzungsmuster stammen von FELDMANN [49]. Teile dieses Abschnitts wurden bereits in ähnlicher Form in [37, 38] veröffentlicht.

5.2.1 Experimentelles und numerisches Setup

Zur Beurteilung der Qualität numerischer Berechnungen mit dem Filmmodell ist ein direkter Vergleich der Benetzungsmuster auf der komplexen Fahrzeugoberfläche ungeeignet. Die Einflussgrößen sind hierbei sehr vielfältig und Randbedingungen sind meist nicht genau bekannt, um sie in die Simulation zu übertragen. Fragen nach der tatsächlichen bei einer Regenfahrt auf das Fahrzeug treffenden und zurückbleibenden Wassermenge sind bislang noch unbeantwortet. Dies gilt nicht nur für eine Fahrt auf öffentlichen oder privaten Strecken, sondern auch für nachgestellte Regenfahrten im Umweltwindkanal. Bei solch komplexen Fällen kann somit nicht zweifelsfrei konkludiert werden, dass die Unterschiede zwischen Experiment und Simulation in den physikalischen Modellen begründet liegen.

Angesichts dieser Tatsache ist an der TU Darmstadt ein Windkanalprüfstand entwickelt und konstruiert worden, in dem vom Fahrzeug abgeleitete Grundlagenexperimente zu Mehrphasenproblemen umgesetzt werden können. Der schematische Aufbau des Prüfstands mit vertikaler Messstrecke ist in Abbildung 5.11 dargestellt. In diesem Windkanal lässt sich

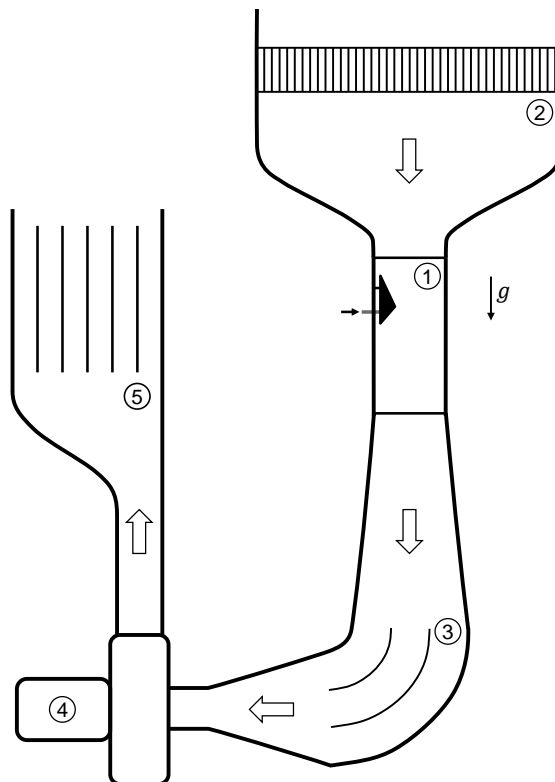


Abbildung 5.11: Aufbau des wasserfesten, vertikalen Windkanals der Technischen Universität Darmstadt (nach [49]) mit 1 - Messstrecke mit Probenkörper und Wasserzuführung, 2 - Beruhigungskammer mit Strömungsgleichrichter, 3 - Luftführung inkl. Umlenkecken, 4 - Gebläse und 5 - Schalldämpfer

die Benetzung von vereinfachten Testkörpern bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten und Wasservolumenströmen untersuchen. Die Anströmgeschwindigkeit u_∞ kann von 0 m s^{-1} bis 30 m s^{-1} und der Wasservolumenstrom pro Breitereinheit, bekannt als Flüssigkeitsbelastung der Oberfläche \dot{B} , von $3 \text{ ml s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ bis $90 \text{ ml s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ variiert werden. Diese Spanne der Flüssigkeitsbelastung entspricht einem Filmreynoldszahlbereich von 3 bis 90 und liegt damit im unteren Transitionsbereich von laminar nach turbulent (vgl. Abschnitt 3.3). Das sich einstellende Benetzungsmuster zeigt je nach Anströmgeschwindigkeit, Wasservolumenstrom und Oberflächeneigenschaften Regionen mit Film, Rinnsalen und Tropfen und wird mit einer Kamera senkrecht zur Oberfläche des Probenkörpers aufgezeichnet. Je nach Konstellation von Oberflächenmaterial des Körpers und Fluid wird ein frühzeitiges Aufreißen des Films begünstigt. Der Grund für das Aufbrechen einer Filmströmung in Rinnsale liegt gemäß [59] in der Reduktion bzw. dem Streben nach einem Minimum der Gesamtenergie. Insbesondere bei sehr geringen Flüssigkeitsbelastungen kann das Benetzungsregime von Rinnsalen weiter in einzelne Tropfen übergehen.

Die Effekte der Oberflächenspannung zwischen Fluidfilm und Gasphase fließen in der Simulation über Quellterme für den Kapillardruck p_σ (siehe Gl. (4.14)) und die Kontaktlinienkraft τ_σ (siehe Gl. (4.15)) in das Gleichungssystem für die Filmdicke und die mittleren Geschwindigkeitskomponenten tangential zur Oberfläche ein. Für dieses Modell ist lediglich die Vorgabe eines konstanten Kontaktwinkels erforderlich. In der Realität unterliegt die Oberfläche jedoch mikroskopischen Störungen. Um die stochastische Streuung des lokalen Dreiphasenkontaktwinkels in der Simulation abzubilden, wird ein Verfahren entwickelt, anhand dessen ein zufällig verteilter Kontaktwinkelteppich auf der Körperoberfläche vorgegeben werden kann. Die Berechnung einer zufälligen, über die Zeit konstanten Kontaktwinkelverteilung erfolgt in MATLAB. Dazu werden von jeder Oberflächenzelle die Lagekoordinaten x , y und z aus dem Simulationsnetz ausgelesen und in einer Tabelle gespeichert. Für jede Zeile der eingelesenen Tabelle wird per Zufallsfunktion ein Kontaktwinkel innerhalb des vorgegebenen Bereichs $[\bar{\theta} \pm \Delta\theta]$ berechnet. Anschließend wird die Kontaktwinkelverteilung auf der Fläche geglättet, um extreme Sprünge in den Kontaktwinkelwerten benachbarter Zellen zu vermeiden. Die finale Tabelle, die jeder Oberflächenzelle einen Kontaktwinkel zuweist, wird als zusätzliche Randbedingung vorgegeben. Dieses Verfahren kann auf beliebig geformte Oberflächen angewendet werden und ermöglicht die Erzeugung leicht unterschiedlicher Benetzungsmuster.

Das zweidimensionale Filmmodell haftet stets an der Wand und existiert nur in der extra erzeugten Shell auf der Oberfläche. Aus diesem Grund ist die Qualität der wandnächsten Zellschicht entscheidend für die Ergebnisqualität des Filmmodells. Die wandnächste Zellschicht wird durch ein möglichst homogenes Netz mit gleichmäßig orientierten Zellen abgebildet. Die Simulationsregion wird mit Polyedern diskretisiert, da komplexe Geometrien mit einer geringeren Gesamtzellenanzahl vernetzt werden können und sich zum anderen eine schwächere Richtungsablenkung der Benetzung durch das Filmmodell im Vergleich zu Hexaederzellen zeigt. Bei der Verwendung von Hexaederzellen weist der Film eine verstärkte Orientierung in Richtung der Diagonalen des Netzes auf [38]. Dies liegt in der Existenz der numerischen Diffusion begründet, die bei Hexaedern in Richtungen schräg zu den Gitterlinien vorliegt und entlang der Gitterlinien verschwindet. Bei Polyederzellen hingegen ist die numerische Diffusion isotrop, wodurch dem Filmmodell keine bevorzugte Fließrichtung aufgezwängt wird [145].

Abgesehen von der Vernetzungsart beeinflusst die Dimension der Zellen die Ergebnisgüte von Mehrphasensimulationen. Bei Berechnungen mit dem Filmmodell können grundsätzlich größere Zellen als bei der Volume-of-Fluid-Methode verwendet werden. Dadurch verkürzt sich die notwendige Rechenzeit, allerdings können kleine Benetzungsregime, wie Tropfen oder Rinnsale, bei zu großer Wahl der Zellgröße nicht mehr präzise abgebildet werden. Die kleinste noch getrennt darstellbare Größe liegt in Größenordnung der lokalen Zelldimension. Der andere Extremfall hin zu kleineren Zellengrößen ist aufgrund von Stabilitätsbedingungen des Filmmodells begrenzt. Eine bei der Herleitung des Filmmodells getroffene Annahme besagt, dass die Filmhöhe stets (viel) kleiner als die charakteristischen Längen senkrecht zur Normalen der Oberfläche sein muss. Eine Missachtung der Bedingung kann zu Stabilitätsproblemen führen. Folglich ist ein Zielkonflikt zwischen gewünschter Auflösung, Sicherstellung der Stabilität und notwendiger Rechenzeit zu lösen. Die Zellgröße wird in diesem Fall so groß wie möglich bei ausreichender Genauigkeit gewählt, um die maximalen Vorteile bezüglich der Rechenzeit durch Verwendung des Filmmodells zu erzielen. Die Luftströmung wird mit dem k - ω -SST-Turbulenzmodell berechnet.

5.2.2 Beobachtungen

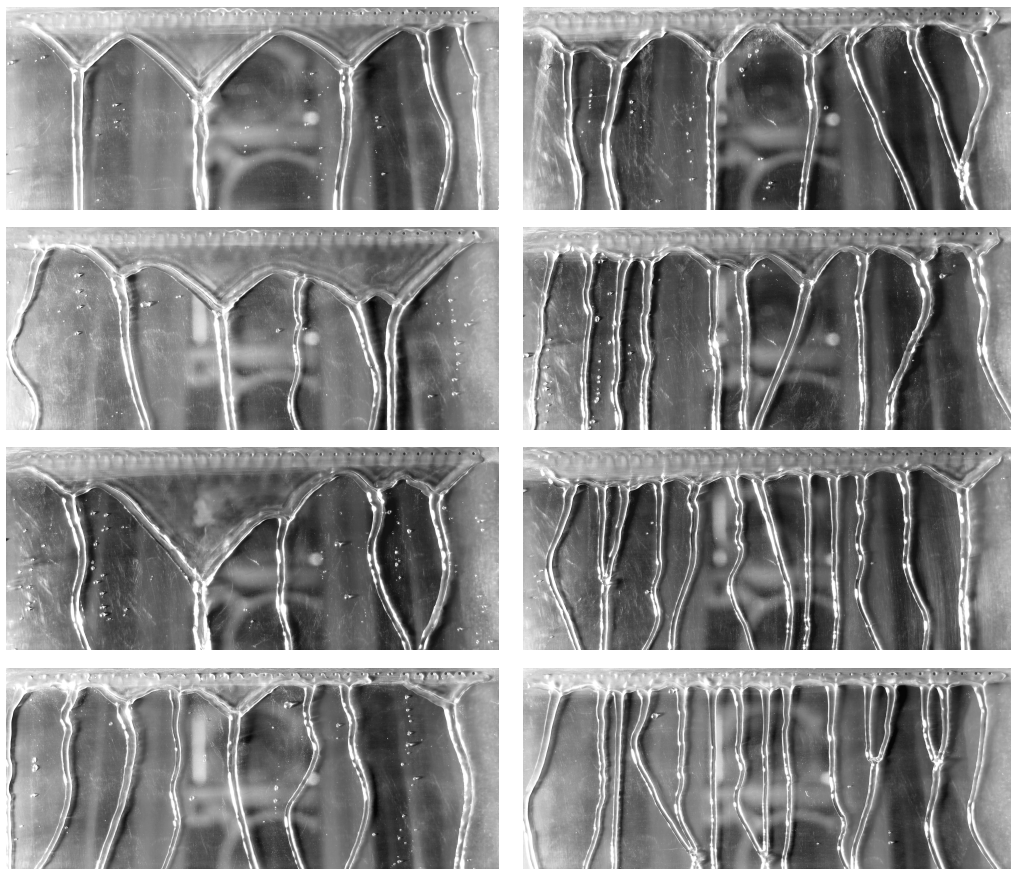


Abbildung 5.12: Streubreite der Benetzungsmuster im Experiment bei gleichen Randbedingungen für Anströmgeschwindigkeit und Wasservolumenstrom (Benetzungsbilder von FELDMANN [49])

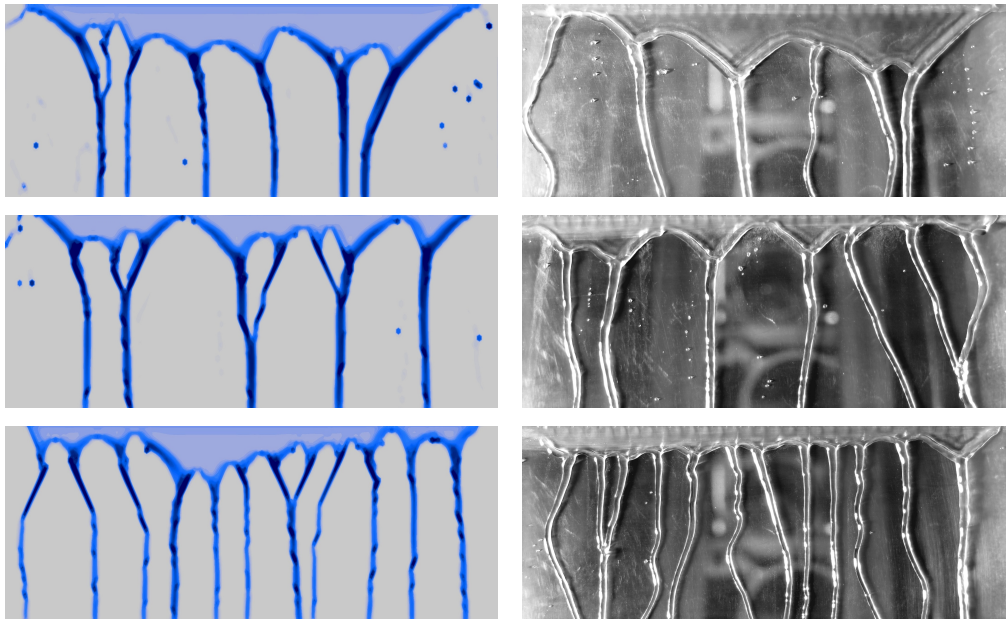


Abbildung 5.13: Gegenüberstellung der Benetzungsmuster aus Simulation (links) und Experiment [49] (rechts) bei einer Anströmgeschwindigkeit von 8 m s^{-1} und einem Wasservolumenstrom von 500 ml min^{-1}

Trotz gleicher Eingangsbedingungen mit 8 m s^{-1} Luftanströmgeschwindigkeit und 500 ml min^{-1} Wasservolumenstrom zeigt sich bei wiederholter Durchführung des Experiments eine große Streuung in den aufgenommenen Benetzungsmustern (vgl. Abbildung 5.12). Durch Variation der vorgegebenen Kontaktwinkelverteilung auf der Plattenoberfläche weisen auch die Simulationen eine gewisse Streubreite auf. Die Streuung der Simulationsergebnisse ist insgesamt geringer als die Streuung der Benetzungsbilder aus dem Experiment. Dennoch ist die Übereinstimmung der Benetzungsmuster von Experiment und Simulation bei der Gegenüberstellung einzelner Momentaufnahmen – dargestellt in Abbildung 5.13 – erstaunlich gut. Um die große, stochastische Streubreite der Daten zu berücksichtigen, ist die Auswertung einer Vielzahl von Experimenten und Simulationen zu den gleichen Randbedingungen notwendig.

Die Benetzungsmuster von Experiment und Simulation werden auf gleiche Weise mit einem in MATLAB programmierten Bildanalysetool ausgewertet. So lassen sich charakteristische Kenngrößen zu Tropfen, Rinnsalen und Filmen automatisiert erheben. Im ersten Schritt wird der Hintergrund vom Benetzungsbild abgezogen. Anschließend werden im relevanten Bildausschnitt die benetzten Stellen detektiert und in die Kategorien Film (grün), Rinnsal (blau) und Tropfen (gelb) unterteilt (vgl. Abbildung 5.14). Im nächsten Schritt können aus dem Binärbild anhand benetzter und unbenetzter Pixel zahlreiche quantitative Kenngrößen, wie u. a. die Rinnsalbreite, der lokale Krümmungsradius, der Fließwinkel relativ zur Anströmrichtung oder die Anzahl der Rinnsale und Tropfen auf einem Benetzungsbild, berechnet werden.

Während der Auswertung werden charakteristische Kenngrößen in einer Datenbank gespeichert. Die ausgewertete Menge an Daten ist groß genug, um die stochastische Streuung der Ergebnisse zu berücksichtigen. Anhand dieses Datensatzes lassen sich Simulation und Experiment quantitativ vergleichen und mögliche Abweichungen feststellen. Darüber hinaus bietet das beschriebene Verfahren die Möglichkeit die Simulationsqualität zu beurteilen, Schwachstellen im Filmmodell aufzuzeigen und physikalische Modelle weiterzuentwickeln.

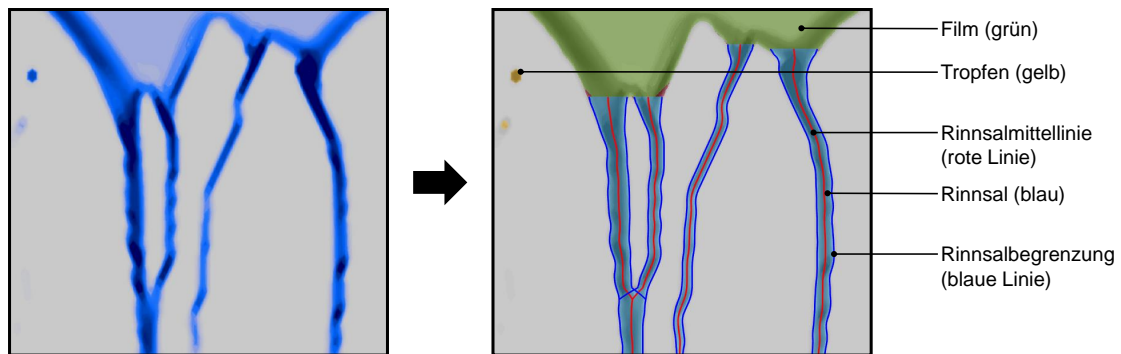


Abbildung 5.14: Grafische Auswertung der Benetzungsmuster mittels Matlab am Beispiel eines Bildausschnitts einer Simulation

5.2.3 Vergleich der Benetzungsmuster anhand ausgewählter Kenngrößen

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Benetzungsmuster exemplarisch an ausgewählten Kenngrößen verglichen. Eine sehr anschauliche und in der Automobilindustrie relevante Größe ist der benetzte Anteil der Fläche. Der prozentuale Anteil ist in Abbildung 5.15 für drei verschiedene Anströmgeschwindigkeiten bei einem konstanten Wasservolumenstrom von 500 ml min^{-1} dargestellt. Die Simulation bildet das Benetzungsverhalten auf dem Testkörper bei den niedrigeren Anströmgeschwindigkeiten von 8 m s^{-1} und 12 m s^{-1} sehr gut ab. Bei diesen Geschwindigkeiten brechen die Wasserfilme in mehrere Rinnsalen auf und der Benetzungsgrad liegt bei etwa 25 % bis 30 %. Der Mittelwert des benetzten Anteils in der Simulation ist leicht höher als im Experiment, was mit einem verzögerten Filmaufbruch begründet ist. Der Effekt des verzögerten Filmaufbrechens ist durch die Vorgabe einer Kontaktwinkelverteilung weniger stark ausgeprägt als in der ursprünglichen Quelle von MEREDITH [115], in der dieser Effekt bereits als Verbesserungspotential genannt wurde.

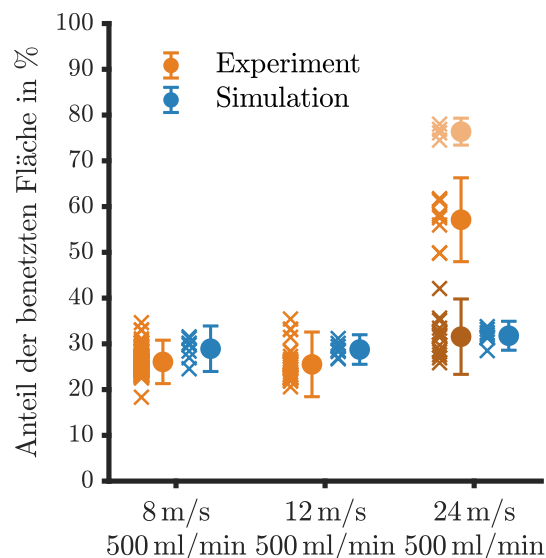


Abbildung 5.15: Benetzter Anteil der Platte für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten

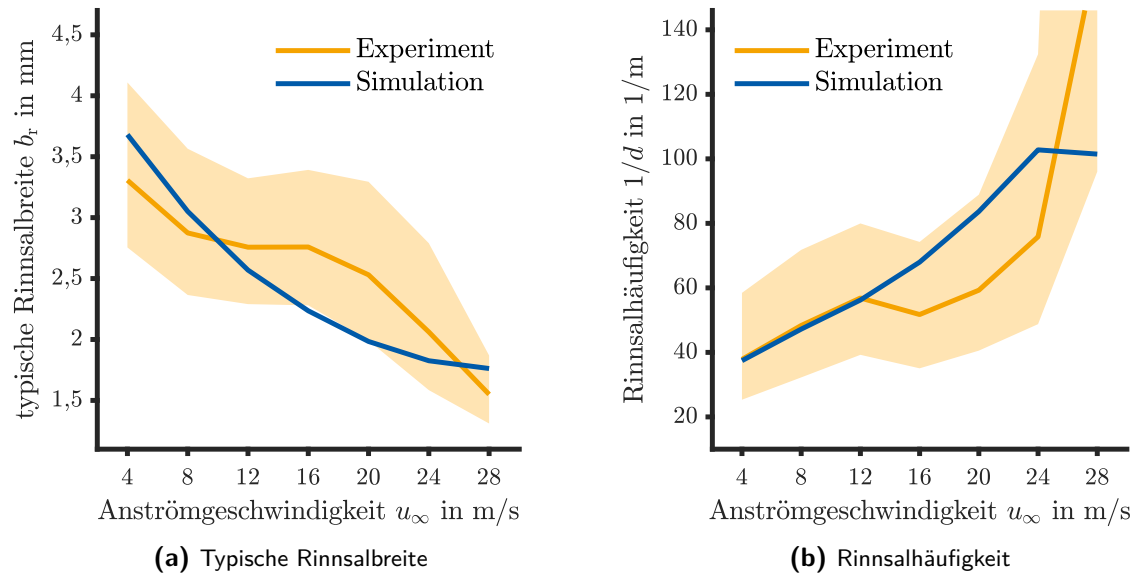


Abbildung 5.16: Charakteristische Rinnsalkenngößen der Benetzung über verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten

Bei der höheren Anströmgeschwindigkeiten von 24 m s^{-1} weisen die Benetzungsmuster im Experiment eine trimodale Verteilung auf. In den meisten Fällen bricht der Film in eine Vielzahl von Rinnsalen auf und der Anteil der benetzten Fläche liegt bei etwa 30 %. Daneben liegt teilweise ein geschlossener Film bzw. ein partieller Filmaufbruch in Rinnsale vor und der benetzte Anteil für die beiden Modi beträgt ungefähr 75 % und 55 %. Die Simulation weist für die Anströmgeschwindigkeit von 24 m s^{-1} eine höhere Reproduzierbarkeit auf, allerdings wird nur eine der drei im Experiment beobachteten Modi abgebildet.

Der Benetzungsgrad einer Scheibe alleine ist allerdings nicht ausreichend zur vollständigen Charakterisierung des störenden Effekts von Wasser in Bezug zur Sichtfreihaltung. Ein dünner, gleichmäßiger Wasserfilm kann hierbei als weniger störend empfunden werden als der ständige Wechsel zwischen benetzten und unbenetzten Stellen, wie sie bei mehreren Rinnsalen auftreten können, obwohl der Benetzungsgrad des Films deutlich höher ist. Dies liegt mitunter an den zahlreichen Krümmungen eines Rinnsals, die jeweils Licht brechen und die Sicht beeinträchtigen können. Folglich sind für die Abschätzung der Sichtbeeinträchtigung weitere Größen hinsichtlich der Abbildungsgenauigkeit zwischen Experiment und Simulation zu untersuchen. In Abbildung 5.16 ist der generelle Trend der Benetzungsmuster über der Anströmgeschwindigkeit aufgetragen. Mit steigender Anströmgeschwindigkeit bricht der Film in mehrere (siehe Abbildung 5.16b) und schmalere (siehe Abbildung 5.16a) Rinnsale auf. Der orange eingefärbte Bereich kennzeichnet die Standardabweichung der Experimente. Dieser Trend wird von der Numerik korrekt vorhergesagt. Die quantitative Betrachtung zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation, zumal die stochastische Schwankung der Messwerte hoch ist.

Beim direkten Vergleich von Detailgrößen wie beispielsweise der Rinnsalbreite sind kleinere Abweichungen zwischen Simulation und Experiment erkennbar. Die mittlere Rinnsalbreite ist in Abbildung 5.17 über der Lauflänge von Filmaufbruch bei 0 mm bis 50 mm für einen

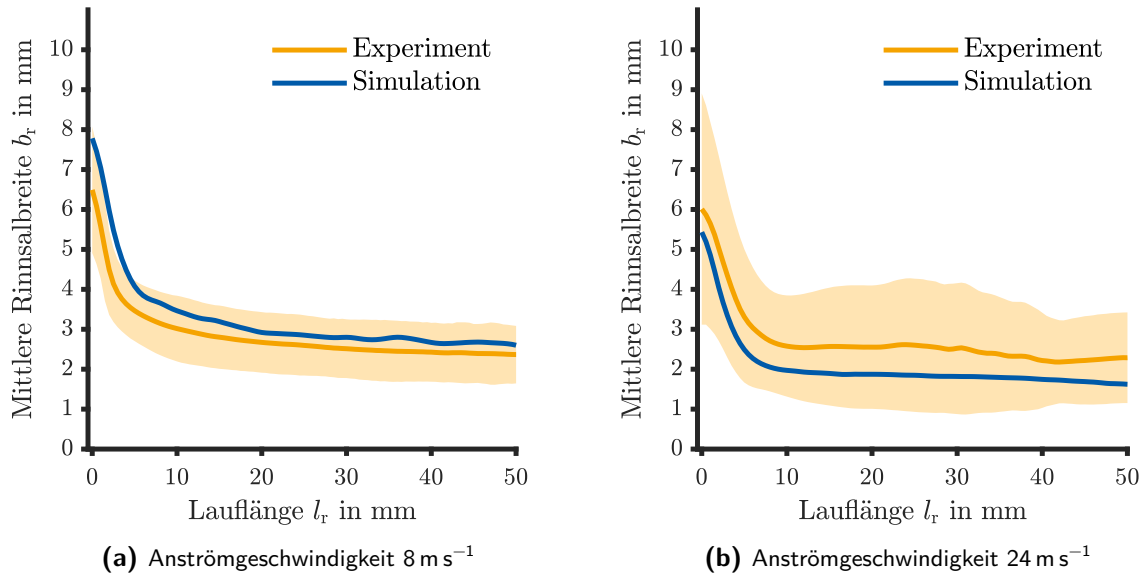


Abbildung 5.17: Mittlere Rinnsalbreite über der Lauflänge mit Standardabweichung der Experimente für die Anströmgeschwindigkeiten 8 m s^{-1} und 24 m s^{-1}

Wasservolumenstrom von 500 ml min^{-1} und eine Anströmgeschwindigkeit von 8 m s^{-1} (Abbildung 5.17a) bzw. 24 m s^{-1} (Abbildung 5.17b) dargestellt. Die Rinnsalbreite nimmt auf den ersten 5 mm bis 10 mm nach dem Filmaufbruch schnell ab. Die Kurvensteigung ist in beiden Fällen nahezu identisch, d.h. das Filmmodell bildet das Einschnürverhalten der Rinnsale korrekt ab. Das Absolutniveau der Rinnsalbreiten ist zwischen Experiment und Simulation hingegen leicht verschoben. Bei 8 m s^{-1} liegt die Kurve der Simulation leicht oberhalb der Kurve des Experiments und bei 24 m s^{-1} leicht darunter, was durch den Schnittpunkt der Kurven zur charakteristischen Rinnsalbreite im Bereich zwischen den Geschwindigkeiten 8 m s^{-1} und 24 m s^{-1} in Abbildung 5.16a erkennbar ist. Die Unterschiede in den Detailgrößen sind auf die zuvor beschriebenen Netzabhängigkeit sowie die Vereinfachungen beim Filmmodell zurückzuführen. Nichtsdestotrotz liegt die Abweichung in einem tolerierbaren Maß, besonders wenn die stochastische Schwankung bei der Beurteilung miteinbezogen wird. Zudem wird hier - analog zu Abbildung 5.16 - die Tendenz erkennbar, dass die Rinnsale mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit schmaler werden.

5.2.4 Fazit

Die Auswahl der Vergleiche zeigt, dass das Filmmodell den generischen Versuchsfall insgesamt sehr gut abbildet. Alle auftretenden Formen des Wassertransports (Film, Rinnsal und Tropfen) werden von den Simulationen wiedergegeben. Durch Vorgabe einer stochastischen Kontaktwinkelverteilung auf der Probenkörperoberfläche kann in der Simulation eine gewisse Streubreite in den Benetzungsmustern erzeugt werden. Lediglich in der Betrachtung von Detailgrößen sind kleinere Abweichungen ersichtlich. Angesichts der getroffenen Vereinfachungen des Film-

modells, des eher geringen Rechenaufwands sowie der starken Streuung der Experimente ist die Ergebnislösung der Simulation jedoch äußerst zufriedenstellend. Grundsätzliche Aussagen zur Benetzung lassen sich somit mit numerischen Simulationen prognostizieren.

5.3 Testfall für Parameterstudien zur Scheibenwischersimulation

Gerade bei sehr komplexen Mehrphasensimulationen, wie der Simulation der Scheibenwischerbewegung, bei der mehrere Funktionen miteinander gekoppelt werden, kann die Rechenzeit rapide ansteigen. Die Durchführung von Parameterstudien im gesamten Simulationsvolumen einer kompletten Scheibenwischersimulation ist folglich nicht in angemessener Zeit durchführbar. Aus diesem Grund wird von der Scheibenwischersimulation ein kleinerer Simulationsfall abgeleitet, der die wesentlichen Elemente der Scheibenwischersimulation beinhaltet. Das in Abbildung 5.18 zu sehende Simulationsvolumen ist etwa 230 mm lang, 145 mm breit und 50 mm bis 75 mm hoch und besteht aus einem Ausschnitt der Frontscheibe, der Wasserfangleiste mit zwei Rinnen und einem A-Säulenstück (siehe Abbildung 5.18). Innerhalb der Hintergrundregion befindet sich die überlappende Overset-Region (in orange hervorgehoben), die mit einer vorgegebenen Bewegung auf der Frontscheibe gleiten kann. Auf eine Netzverformung wie bei der in Kapitel 6 aufgeführten Scheibenwischermethodik kann in diesem Fall verzichtet werden, da der Frontscheibenausschnitt bewusst planar gestaltet wird. Die Frontscheibe des abgeleiteten Simulationsfalls ist im Vergleich zum Gesamtfahrzeug um 15° flacher geneigt. Dies stellt einen Kompromiss zwischen vorliegender Steigung der Scheibe und benötigter Breite der Hintergrundregion dar, bei dem das eingebrachte Wasser mit dem Schieber in die Rinnen der Wasserfangleiste transportiert wird und nicht allein durch Gravita-

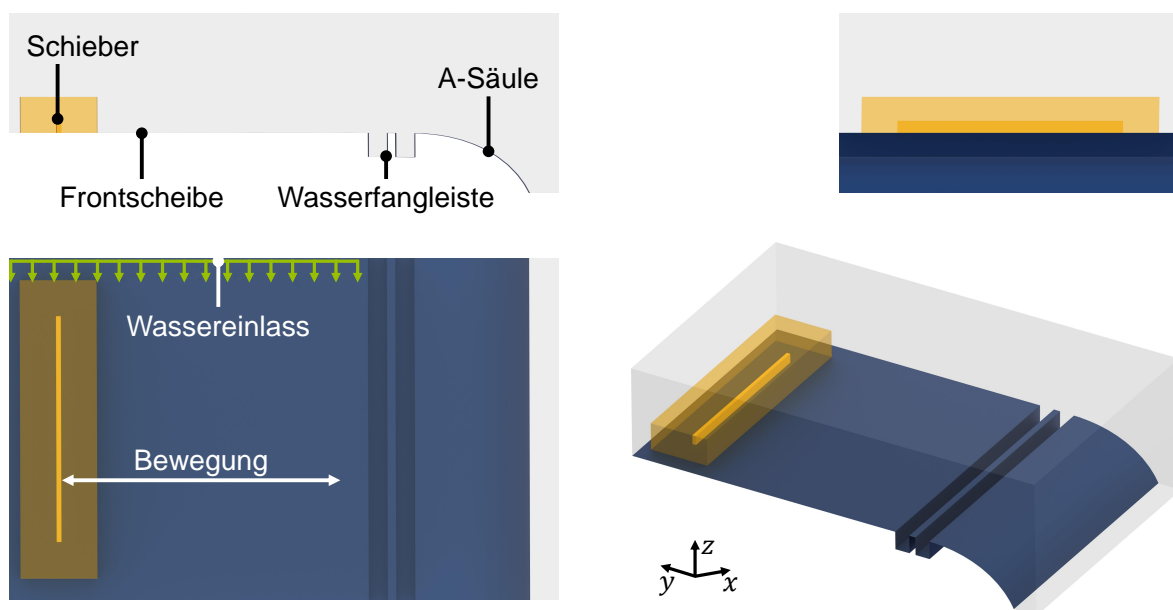


Abbildung 5.18: Vom Fahrzeug abgeleitete Hintergrundregion mit einem Schieber als Ersatz für den Scheibenwischer in der orange hervorgehobenen Overset-Region.

tion aus der Simulationsregion fließt. Der Simulationsfall weist abgesehen von Steigung und Krümmung der Frontscheibe eine hohe Übereinstimmung zur Gesamtfahrzeuggeometrie auf. Insbesondere die Wasserfangleiste und die A-Säule sind realitätsnah dargestellt.

Um die Simulationszeiten zu reduzieren, wird der Frontscheibenabschnitt mit einer definierten Filmdicke initialisiert und ohne überlagerte Luftanströmung gerechnet. Zusätzlich befindet sich an der oberen Kante der Scheibe ein Einlassspalt, über den während der Simulation ein kontinuierlicher Wassereintrag eingebracht wird. Der Scheibenwischer ist vereinfacht durch einen Balken repräsentiert. Dieser befindet sich in einer separaten Overset-Region innerhalb der Hintergrundregion und wird mit einer vorgegebenen Translation über die Frontscheibe bewegt. Die Bewegung wird durch eine sinusförmige Translationsgeschwindigkeit gemäß Gl. (5.1) in der Software definiert, um den Effekt der reduzierten Geschwindigkeit an den Wendepunkten der Wischbewegung abzubilden. Darin ist t die Zeitvariable, f die Frequenz der Bewegung und \tilde{A} die Amplitude. Die Amplitude wird separat berechnet, sodass die bewegte Overset-Region die gewünschte Distanz zurücklegt. Da der Testfall eine hohe Ähnlichkeit zu der in Kapitel 6 beschriebenen Scheibenwischersimulation aufweist, wird an dieser Stelle auf eine detailliertere Beschreibung des Simulationsaufbaus verzichtet.

$$u_{\text{Schieber}} = \tilde{A} \sin(2\pi ft) \quad (5.1)$$

An dem beschriebenen Testfall werden verschiedene Voruntersuchungen zur Scheibenwischersimulation durchgeführt. An dieser Stelle soll jedoch nicht jede einzelne Untersuchung im Detail diskutiert werden. Stattdessen wird dies exemplarisch für die Gestaltung von Kanten aufgeführt, während die weiteren Erkenntnisse in einer Übersicht zusammengefasst sind.

Abbildung 5.19a zeigt die Konturen von verschieden gestalteten Kanten. In schwarz ist eine ideal scharfe Kante mit rechtem Winkel zu sehen, wie sie üblicherweise in einer Simulation abgebildet wird. In diesem Fall kann die Geometrie selbst mit wenigen, großen Volumenzellen gut repräsentiert werden. Da bei der VOF-Methode jedoch ohnehin eine feinere Auflösung benötigt wird, kann die Kante im Fall einer mehrphasigen Simulation ohne wesentliche Erhöhung der Zellanzahl mit einer Fase oder einem Radius versehen werden. Neben der scharfen Kante werden je zwei unterschiedlich große Fasen und Rundungen getestet. Die 0,5 mm Fase ist in blau und die 1,0 mm Fase in orange dargestellt. Eine verrundete Kante wird in der Simulation durch mehrere Schritte angenähert. Die Rundung mit dem Radius von 0,5 mm (gelbe Kontur) wird durch vier Elemente und die Rundung mit einem Radius von 1,0 mm (violette Kontur) durch acht Elemente angenähert. Grundsätzlich gilt: Je mehr Elemente für einen Radius verwendet werden, desto besser stimmt dieser mit der kreisförmigen Geometrie überein, wobei gleichzeitig die Anzahl der Oberflächenzellen steigt. Hierbei ist ein Kompromiss für die Genauigkeit der Geometriedarstellung und die dafür benötigte Zellanzahl zu finden.

In Abbildung 5.19b sind zwei zum selben physikalischen Zeitpunkt gespeicherte Momentaufnahmen aus der Simulation gegenübergestellt. Abgebildet ist jeweils eine Ansicht in Richtung der Wasserfangleiste. Die Flüssigkeit wird von links mit dem periodisch bewegten Schieber zur Wasserfangleiste befördert. Die beiden Simulationen unterscheiden sich ausschließlich in der Abbildung der vordersten Kante. Im linken Bild ist die Kante ideal scharf und im rechten Bild

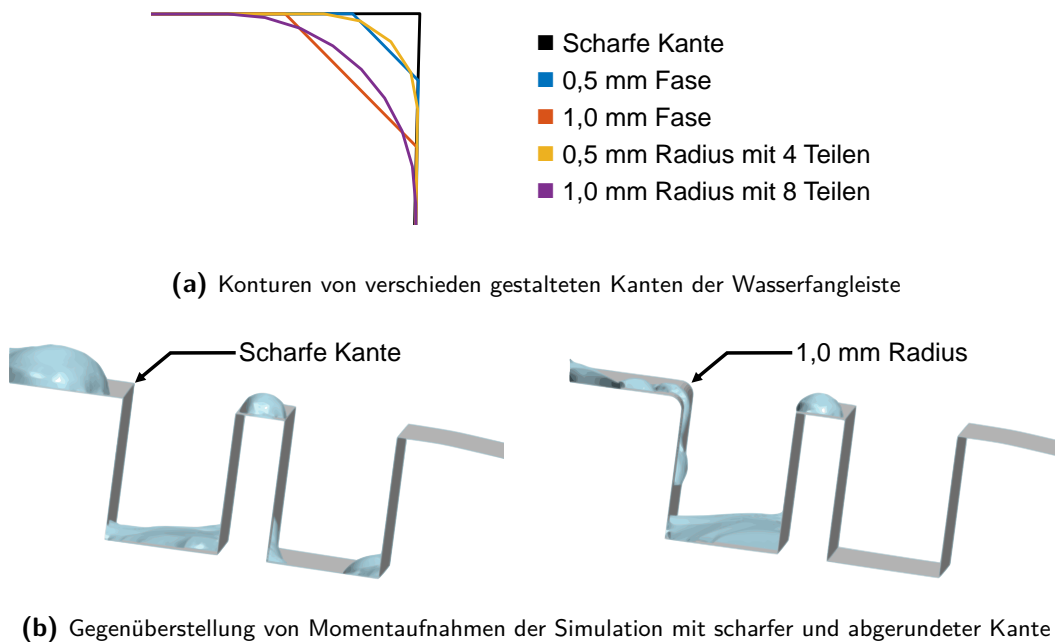


Abbildung 5.19: Voruntersuchungen am Testfall zur Scheibenwischersimulation mit verschieden gestalteten Kanten

mit einem Radius von 1,0 mm versehen. Im Fall der scharfen Kante löst die Flüssigkeitsphase früher ab und gelangt in die zweite Rinne der Wasserfangleiste, während bei der Simulation mit abgerundeter Kante kein Wasser in der zweiten Rinne sichtbar ist. Die zur Wasserfangleiste transportierte Flüssigkeit folgt der konvexen Oberfläche aufgrund des Coandă-Effekts. Dadurch fließt mehr Flüssigkeit in die erste Rinne, was in der Momentaufnahme mit der stärkeren Benetzung der seitlichen Wand und mit dem höheren Wasserpegel in der ersten Rinne bestätigt wird. In beiden Fällen wird der Steg zwischen den zwei Rinnen benetzt. Es sei angemerkt, dass die kleineren Fasen und Radien keine eindeutig auf die Kantengestaltung zurückführbaren Unterschiede im Vergleich mit der scharfkantigen Simulation aufweisen. Der Einfluss der Gestaltung kann erst ab einer gewissen Größe der Änderung eindeutig zugeordnet werden, wobei das Fluid einer abgerundeten Kante in der Regel besser als einer Fase folgt.

Weitere Erkenntnisse des aufgebauten Testfalls sind nachfolgend stichpunktartig zusammengefasst:

- **Bewegungsgeschwindigkeit**

Durch Erhöhung der Frequenz des Schiebers steigt die Bewegungsgeschwindigkeit bei unveränderter, zurückgelegter Strecke an und die beförderte Flüssigkeit wird tendenziell eher über die Wasserfangleiste geschoben. Dieses Verhalten wird von der Simulation erwartungsgemäß abgebildet.

- **Einfluss des zurückgelegten Wegs**

Durch Erhöhung des zurückgelegten Wegs des Schiebers nähert sich zum einen der Schieber an die A-Säule an und zum anderen führt dies bei gleicher Frequenz der Bewegung zu einer erhöhten Geschwindigkeit, wodurch ebenfalls mehr Flüssigkeit über die A-Säule befördert wird.

- **Netzgröße**

Die Simulationsregion wird aufgrund der isotropen Diffusion mit möglichst gleichmäßigen Polyederzellen vernetzt (vgl. Abschnitt 5.2). Das Netz muss dabei alle relevanten Geometrien und Strömungsphänomene fein genug auflösen und die Anforderungen an die Wandbehandlung erfüllen. Der Einfluss der Zellgröße ist für die Flüssigkeitsphase der VOF-Methode stärker als beim Fluidfilm. Bei der Wahl von zu großen Volumenzellen in Bereichen, in denen mit VOF gerechnet wird, treten teils unphysikalische Effekte auf und die Phasengrenze zwischen Wasser- und Luftphase kann verschmieren. Gleichzeitig beeinflusst die Netzgröße in Kombination mit dem eingestellten Grenzwert α_{trans} den Übergang zwischen den beiden Mehrphasenmodellen (vgl. Abschnitt 4.4.4). Dieser Umstand kann gezielt ausgenutzt werden, um den Wechsel zwischen den beiden Verfahren zu steuern.

- **Zeitschritt**

Der Zeitschritt in der Simulation ist so zu wählen, dass die CFL-Zahl nahe der freien Oberfläche bei einer Zeitdiskretisierung erster Ordnung kleiner als 0,7 und bei einer Zeitdiskretisierung zweiter Ordnung kleiner als 0,5 ist [145]. Dies erhöht die Stabilität und minimiert Diskretisierungsfehler. Der begrenzende Faktor bei der Wahl des Zeitschritts liegt im Bereich mit den kleinsten Zellen. Durch Verwendung des Mehrschrittverfahrens für die Volume-of-Fluid-Methode kann der Zeitschritt insgesamt größer gewählt werden, weil zur Erzielung der vorgegebenen CFL-Grenze in den kritischen Regionen zeitliche Zwischenschritte berechnet werden. Das Verfahren mit zeitlichen Subzyklen erhöht die Erfüllungsrate der CFL-Bedingung, da selbst unerwartete Geschwindigkeitspeaks abgesichert werden. Zusätzlich ist darauf zu achten, dass bei der Netzbewegung innerhalb eines Zeitschrittes keine komplette Zelle übersprungen wird.

- **Massenkorrekturverfahren für Overset-Mesh**

Bei der Interpolation am Interface zwischen der Overset-Region und der Hintergrundregion treten Interpolationsfehler auf, wodurch Erhaltungsgleichungen verletzt werden können. Im Fall einer nicht eingehaltenen Massenerhaltung, d. h. die Summe aller Massenströme über die Interfaceflächen ist ungleich Null, wird das Druckkorrekturverfahren in der globalen Simulationsregion inkonsistent. Zur Erzwingung der Massenerhaltung bei Overset-Mesh-Simulationen gibt es die zwei Korrekturverfahren Massenquelltermkorrektur und Massenstromkorrektur [64]. Diese Korrekturverfahren sind für einphasige Strömungsprobleme ausgelegt. Bei der Anwendung der genannten Massenkorrekturverfahren auf mehrphasige Simulationen mit dem hybriden Modell zeigt sich jedoch ein unphysikalisches Verhalten, weshalb diese Verfahren in dieser Arbeit nicht genutzt werden. Der Verletzung der Erhaltungsgleichungen wird stattdessen durch die Wahl möglichst identischer Volumenzellen im Interpolationsbereich zwischen der Overset-Region und der Hintergrundregion minimiert, da die Unterschiede in den geometrischen Eigenschaften der Interpolationszellen (Größe, Orientierung, Seitenverhältnis, etc.) den numerischen Fehler bestimmen. Durch die Anpassung der Zellgrößen bei paralleler Erhöhung der inneren Iterationen kann der Einfluss der nicht erhaltungskonformen Interpolation am OSM-Interface auf ein Minimum reduziert werden.

- **Darstellung von Kanten**

Im Gegensatz zur Simulation existieren in der Realität keine ideal scharfkantigen Ecken. Je schärfer eine Kante in der Simulation dargestellt ist, desto früher löst die Flüssigkeitsphase an der Kante ab. Wird die Kante hingegen mit einem Radius oder einer Fase abgebildet, so folgt die Flüssigkeit der Kontur länger. Dieser Effekt ist bei sehr kleinen Radien unauffällig und tritt erst ab einem gewissen Ausmaß der Kantenbeeinflussung auf. Die relevantesten Kanten werden in der Simulation besonders fein diskretisiert und teils mit einem leichten Radius versehen.

Die untersuchten Parametervariationen bestätigen die erwarteten Trends, womit Vertrauen für die Simulationsergebnisse aufgebaut wird. Gleichzeitig werden in dem reduzierten Testfall wichtige Erkenntnisse für die Scheibenwischersimulationen gesammelt. Dies betrifft einerseits den allgemeinen Aufbau einer äußerst komplexen Simulation wie der Mehrphasensimulation mit bewegten Scheibenwischern und andererseits Aspekte wie die Wahl der Netzgröße und des Zeitschritts, die Gestaltung des Übergangs von Fluidfilm zu VOF und umgekehrt oder die Definition von Kontaktwinkeln auf Oberflächen. Viele Parameter sind jedoch voneinander abhängig und können daher nicht individuell betrachtet werden. Ein Beispiel dafür ist die Zellgröße, die bei einer Änderung mit dem Zeitschritt abgestimmt werden muss, die Wandbehandlung, die Stabilität und die Kopplung bei Chimera-Gittern mitbestimmt, Einfluss auf die Wahl des verwendeten Verfahrens beim hybriden Mehrphasenmodell hat und die Darstellung der Wasserphase im Allgemeinen beeinflusst.

5.4 Vergleich der Strömungsverhältnisse der Simulation des gesamten Fahrzeugs mit verschiedenen Simulationen im Fahrzeugausschnitt

Die Mehrphasensimulation zur Scheibenwischerbewegung ist aufgrund der Vielzahl an gekoppelten Modellen und der hohen Anforderung an die räumliche und zeitliche Auflösung extrem aufwendig. Dabei wird ein instationärer, auf der IDDES [143, 157] basierender Strömungslöser mit $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell nach MENTER [113] und das hybride Mehrphasenmodell mit Mehrphaseninteraktionsmodellen verwendet. Zur Abbildung der Scheibenwischerbewegung werden Chimera-Gitter mit einer vorgegebenen Festkörperbewegung beaufschlagt, wobei durch zusätzliche Netzverformung der permanente Kontakt zwischen dem Scheibenwischerblatt und der Frontscheibe sichergestellt wird. Um bei der Berechnung der Scheibenwischerbewegung die Zellanzahl und damit den Aufwand zu reduzieren, wird lediglich in einem kleinen Fahrzeugausschnitt gerechnet. Der in Abbildung 5.20 zu sehende Fahrzeugausschnitt erstreckt sich in x -Richtung von der Mitte der Motorhaube bis zur B-Säule, in y -Richtung über die gesamte Fahrzeugbreite und in z -Richtung von unterhalb der Türgriffe bis etwa 500 mm über das Fahrzeugdach. Damit ist der Ausschnitt insgesamt etwa 0,40 Fahrzeuglängen lang, 1,55 Fahrzeugbreiten breit und 0,85 Fahrzeughöhen hoch. Die orange hervorgehobenen Regionen stellen die einzelnen Overset-Regionen der Scheibenwischer innerhalb der Hintergrundregion dar. Die Simulation im Fahrzeugausschnitt wird mit Strömungsfeldgrößen einer dazugehörigen Gesamtfahrzeugsimulation initialisiert und an den äußeren Wänden werden die erforderlichen

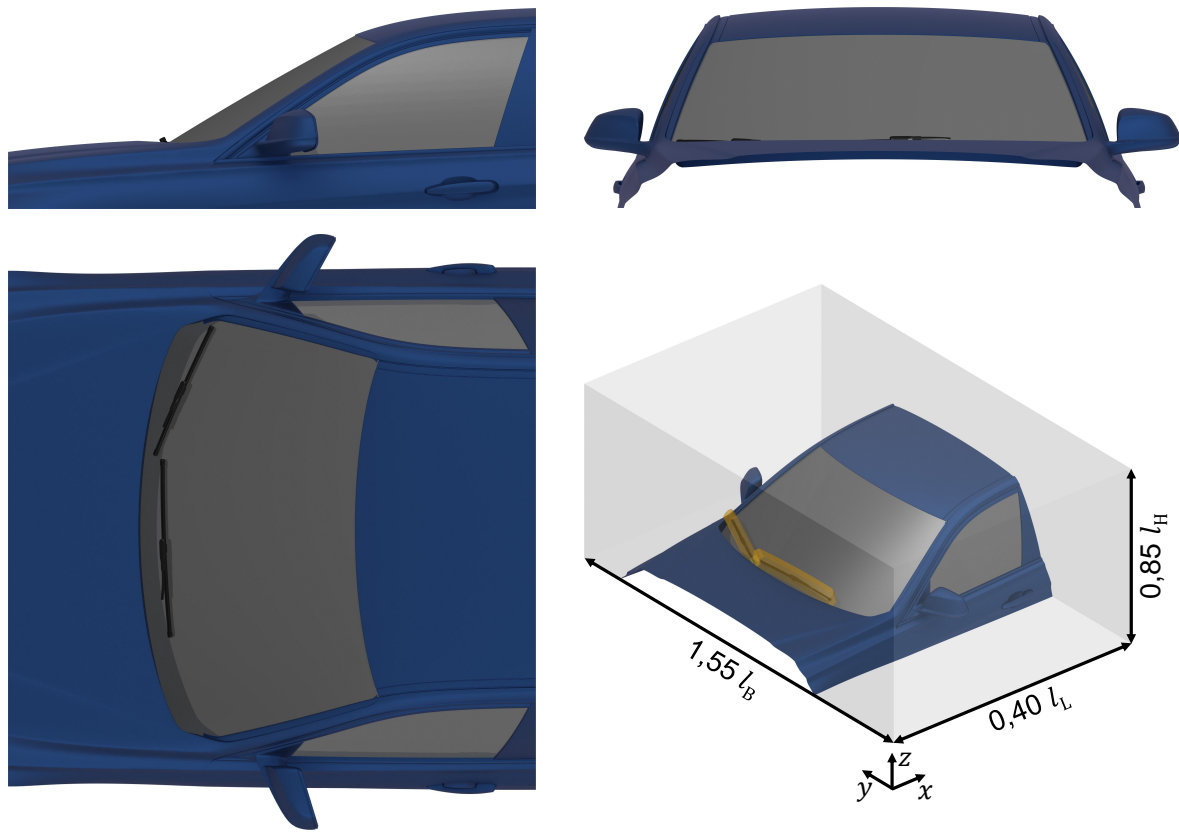


Abbildung 5.20: Begrenzung des Simulationsvolumens auf den dargestellten Fahrzeugausschnitt mit orange markierten Overset-Regionen der Scheibenwischer

Strömungsgrößen aus der Gesamtfahrzeugsimulation (Geschwindigkeiten, Druck, Wasser- bzw. Luft-Volumenanteil und turbulente Kenngrößen wie die turbulente kinetische Energie und die spezifische Dissipationsrate) als Randbedingungen vorgegeben.

Im Folgenden werden die Strömungsverhältnisse der Gesamtfahrzeugsimulation mit denen der Simulation im Fahrzeugausschnitt gegenübergestellt, um die Vergleichbarkeit zu prüfen. Dazu wird die Gesamtfahrzeugsimulation mit drei Simulationen eines Fahrzeugausschnitts bei einer Anströmgeschwindigkeit von 80 km h^{-1} verglichen. Die Fahrzeugausschnittsimulationen unterscheiden sich ausschließlich in der Art der Vernetzung und in der Wandbehandlung (siehe Abbildung 5.21). Die erste der drei Simulationen weist eine vergleichbare Vernetzung wie die Gesamtfahrzeugsimulation auf. Es werden ebenfalls Hexaeder verwendet und die Wandgrenzschicht wird mit mehreren Prismenschichten aufgelöst. Die zweite der drei Simulationen wird mit Polyedern und gleichen Prismenschichten wie in der ersten Simulation vernetzt, da sich gezeigt hat, dass das Filmmodell bei Verwendung von Polyederzellen weniger netzabhängig ist (vgl. Abschnitt 5.2). In der dritten Simulation wird die Anzahl der wandnahen Prismenschichten deutlich reduziert, sodass nun das universelle Wandgesetz zur Berechnung verwendet wird. Der Wechsel der Wandbehandlung ist notwendig, da insbesondere bei einer Auflösung der Wandgrenzschicht sehr flache Zellen entstehen, die beim Netzverformungsprozess während der Scheibenwischerbewegung zu einem Abbruch der Simulation führen können. Die Gründe für den Abbruch sind überwiegend auf die Erzeugung von Zellen mit negativen Volumen und die

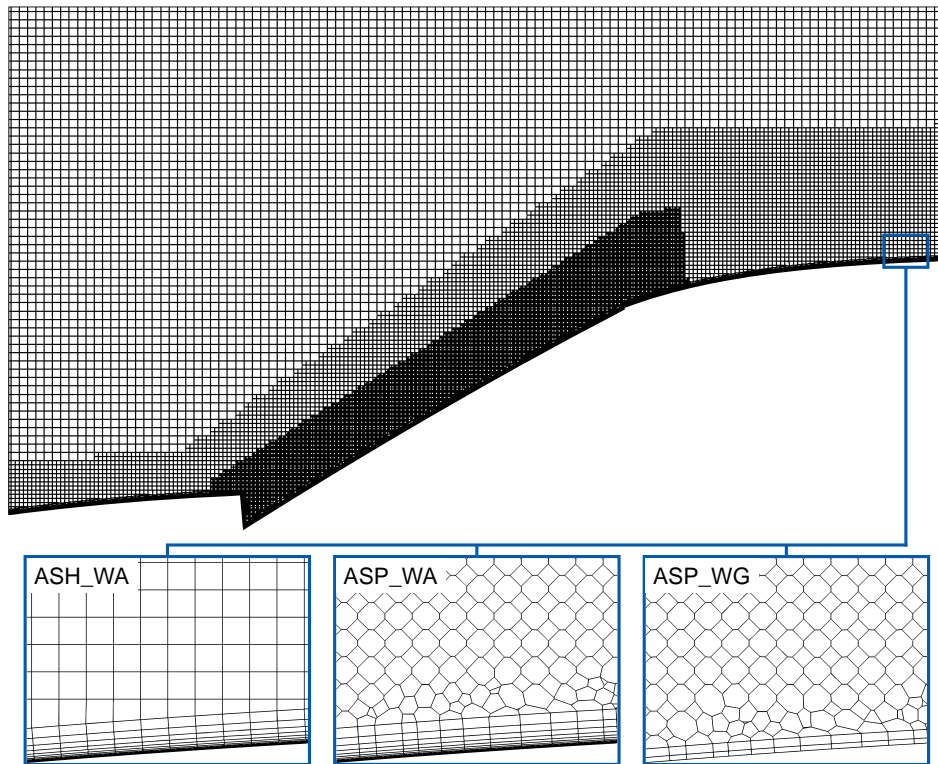


Abbildung 5.21: Räumliche Diskretisierung der Fahrzeugausschnitte durch Hexaeder mit Wandschichtauflösung, Polyeder mit Wandschichtauflösung und Polyeder mit universellem Wandgesetz jeweils in der Mittelschnittebene

starke Abnahme der Zellqualität zurückzuführen. Die in Tabelle 5.2 aufgeführten Simulationen werden anhand von Druckbeiwerten auf der Außenhaut und Strömungsfeldern miteinander verglichen.

Tabelle 5.2: Unterschiede in den Simulationen am Fahrzeugausschnitt

Bezeichnung	Simulationsregion	Zellentyp	Wandbehandlung
GFZG	Gesamtfahrzeug	Hexaeder	Aufgelöste Grenzschicht
ASH_WA	Fahrzeugausschnitt	Hexaeder	Aufgelöste Grenzschicht
ASP_WA	Fahrzeugausschnitt	Polyeder	Aufgelöste Grenzschicht
ASP_WG	Fahrzeugausschnitt	Polyeder	Universelles Wandgesetz

5.4.1 Druckbeiwert auf der Außenhaut

Zur Überprüfung der Druckbeiwerte auf der Fahrzeugaußenhaut werden diese in zwei y -Schnitten (einmal in der Fahrzeugmitte und einmal um 200 mm zur Fahrerseite verschoben) sowie in einem x -Schnitt am Dachansatz ausgewertet. Die Druckverteilung auf einer gekrümmten Fahrzeugoberfläche lässt sich mit Hilfe der radialen Druckgleichung in Gl. (5.2) nachvollziehen. Die Gleichung entsteht durch eine Kräftebilanzierung am Fluidelement und

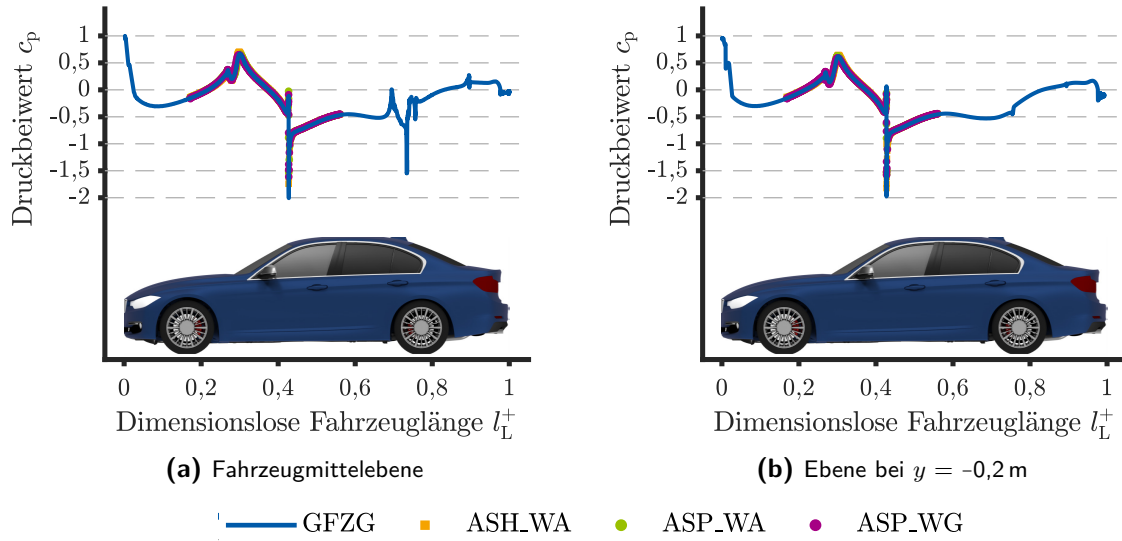


Abbildung 5.22: Dimensionsloser Druckbeiwert über der dimensionslosen Fahrzeuglänge in der Fahrzeugmittelebene und in einer um 200 mm in negative y -Richtung verschobenen Ebene zur Fahrzeugmitte

besagt, dass die Krümmung der Stromlinien direkt mit dem Druck zusammenhängt. Demnach resultieren starke Stromlinienkrümmungen in großen Druckänderungen, was in nachfolgenden Diagrammen bestätigt wird.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{u^2}{r} \quad (5.2)$$

Abbildung 5.22a zeigt den dimensionslosen Druckbeiwert c_p in der Fahrzeugmittelebene über der dimensionslosen Fahrzeuglänge l_L^+ aufgetragen. Die Ergebnisse der Gesamtfahrzeugsimulation (GFZG) sind als blaue, durchgezogene Linie dargestellt, die der Ausschnittsimulation mit Hexaedern (ASH_WA) mit orangen, quadratischen Markern, die der Ausschnittsimulation mit Polyedern (ASP_WA) mit grünen, runden Markern und die der Ausschnittsimulation mit Polyedern sowie Wandgesetz (ASP_WG) mit lila, runden Markern. Der Vergleich der Gesamtfahrzeugsimulation mit den Fahrzeugausschnitten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Das Druckniveau und der Verlauf sind in allen Fällen gleich. Lediglich die Drucksprünge sind minimal stärker bzw. schwächer ausgeprägt und der s-förmige Verlauf im Bereich des Windlaufs bei einer dimensionslosen Fahrzeuglänge von etwa $0,27 < l_L^+ < 0,30$ ist bei den Simulationen ASH_WA und ASP_WA leicht überbewertet im Vergleich zur Simulation GFZG. Interessanterweise trifft die Simulation ASP_WG mit dem Wandgesetz die Gesamtfahrzeugsimulation GFZG besser.

Im Staudruck an der Fahrzeugfront herrscht der höchste Druckbeiwert. Dieser fällt mit zunehmender Fahrzeuglänge zunächst ab und steigt anschließend entlang der Motorhaube bis zur Frontscheibe an. An der Dachkante bei einer dimensionslosen Fahrzeuglänge von $l_L^+ = 0,43$ sowie im Bereich der Dachantenne bei $l_L^+ = 0,73$ kommt es zu starken Sprüngen im Druckbeiwert. Die Sprünge sind durch die Kanten in der Geometrie zu erklären.

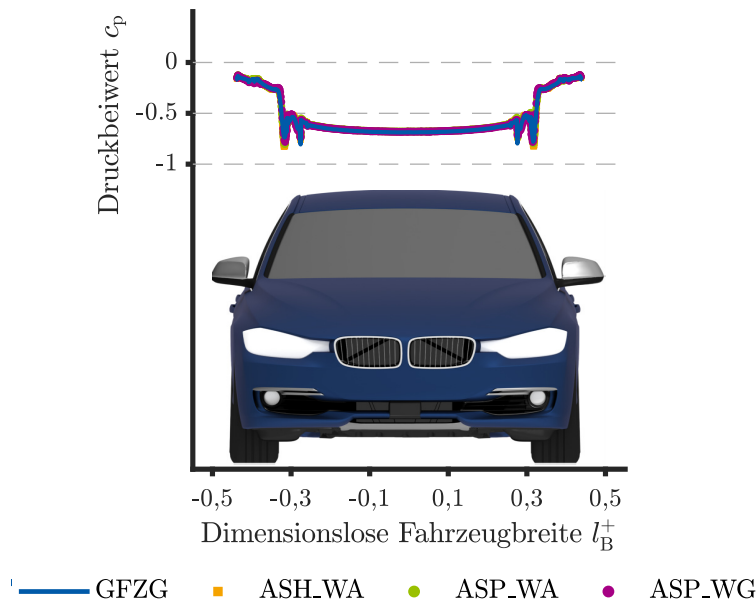


Abbildung 5.23: Dimensionsloser Druckbeiwert über der dimensionslosen Fahrzeugbreite in der Ebene bei $x = 1,40 \text{ m}$

Der Druckverlauf in der um 200 mm verschobenen y -Ebene zeigt einen ähnlichen Verlauf wie in der Mittelschnittebene (vgl. Abbildung 5.22b). Durch die y -Verschiebung verläuft die Auswertelinie auf der Außenhaut nun nicht mehr durch die Dachantenne, wodurch im Bereich von $l_L^+ = 0,75$ kein Drucksprung mehr vorliegt. Der Drucksprung an der Dachkante bei $l_L^+ = 0,43$ ist hingegen wie erwartet erhalten geblieben.

Abbildung 5.23 zeigt den Druckverlauf auf der Außenhaut in der x -Ebene bei $x = 1,40 \text{ m}$ (entspricht der dimensionslosen Fahrzeuglänge von $l_L^+ = 0,47$) über der dimensionslosen Fahrzeugbreite l_B^+ aufgetragen. Der Verlauf ist symmetrisch zur Mittelschnittebene. Der Druckbeiwert fällt von außen nach innen gehend ab. Im Bereich des äußeren Dachs bei $l_B^+ = \pm 0,28$ und nahe der Zierleiste entlang der Seitenscheibe bei $l_B^+ = \pm 0,32$ sind jeweils Drucksprünge ersichtlich, die durch Stufen in der Geometrie verursacht werden. Der Verlauf dazwischen ist leicht u-förmig.

5.4.2 Geschwindigkeitsfelder in verschiedenen Schnittebenen

Neben den Druckverläufen auf der Außenhaut werden die in Tabelle 5.2 aufgeführten Simulationsvarianten für verschiedene Schnittebenen anhand zeitlich gemittelter Strömungsfeldgrößen verglichen, da ein Vergleich instationärer Größen stark vom Zeitpunkt der Betrachtung abhängig ist. Als Strömungsfeldgröße wird die gemittelte, dimensionslose Geschwindigkeit u^+ herangezogen. Die dimensionslose Geschwindigkeit u^+ entspricht der mit der Anströmungsgeschwindigkeit u_∞ normierten Geschwindigkeitsmagnitude. Die Ausschnittsimulationen werden exemplarisch an einer y -Ebene und einer x -Ebene mit der Gesamtfahrzeugsimulation verglichen. Weitere, gegenübergestellte Schnittebenen und Strömungsgrößen weisen eine ähnlich hohe Übereinstimmungsgüte auf.

In Abbildung 5.24 wird die gemittelte, dimensionslose Geschwindigkeit u^+ in der Fahrzeugmittelebene mit einem weißen, äquidistanten Hilfsgitter überlagert. Zur Darstellung der dimensionslosen Geschwindigkeit werden 24 Farbabstufungen gewählt, wodurch scharfe Kanten zwischen benachbarten Geschwindigkeitsbereichen entstehen. Eine solche Kante entspricht einer Isolinie mit gleicher Geschwindigkeit. Im Bereich des Windlaufs ist analog zur Umströmung einer rückspringenden Stufe ein Rezirkulationsgebiet (blauer Bereich) erkennbar. Etwas strömungsabwärts befindet sich ein Staupunkt auf der unteren Hälfte der Frontscheibe, in dem lokal ein hoher Druck und niedrige Geschwindigkeiten herrschen. Von dort wird die Strömung bis zur Fahrzeugdachkante beschleunigt, wo die höchsten Geschwindigkeiten (roter Bereich) vorliegen.

Die Schnittebene GFZG bildet die Referenz, die das Ergebnis der Gesamtfahrzeugsimulation zeigt. Bei dieser Simulation liegen die Begrenzungswände der Simulationsregion soweit vom Fahrzeug entfernt, dass ein Einfluss dieser auf die Strömungsergebnisse in der Nähe des Fahrzeug ausgeschlossen werden kann. Beim Vergleich mit den Ausschnittsimulationen schneiden die Isolinien die Berandungsflächen des Ausschnitts jeweils an den gleichen Stellen. Lediglich bei den Extrema sind minimale Unterschiede in den Strömungsgrößen feststellbar. Insgesamt zeigt der Vergleich sowohl qualitativ als auch quantitativ eine gute Übereinstimmung mit der Gesamtfahrzeugsimulation.

Abbildung 5.25 zeigt eine analoge Gegenüberstellung der Gesamtfahrzeugsimulation mit den Ausschnittsimulationen für die x -Ebene $x = 1,50$ m. Als Vergleichsgröße wird die gemittelte, dimensionslose Geschwindigkeit u^+ gewählt und zur besseren Vergleichbarkeit werden weiße, äquidistante Hilfsgitterlinien über die Ebenen gelegt. Der Außenspiegelnachlauf und der A-Säulenwirbel werden von allen drei Ausschnittsimulationen vergleichbar wiedergegeben. Ein Unterschied zwischen der Gesamtfahrzeugsimulation und den Simulationen im Ausschnitt liegt im Bereich der oberen, rechten Ecke des Ausschnitts. In der Gesamtfahrzeugsimulation ist der Bereich mit dem niedrigeren Geschwindigkeitsniveau (helles orange) etwas größer und die Isolinie verläuft näher am Fahrzeug als in den Ausschnittsimulationen. Da dieser Unterschied in allen drei Ausschnittsimulationen auftritt, ist er nicht auf die unterschiedliche Vernetzung oder Wandbehandlung zurückzuführen. Nichtsdestotrotz ist die Übereinstimmung der Strömungsfelder auch in diesem Fall gut. Insgesamt zeigt die Simulation ASP_WG mit Ausnutzung des Wandgesetzes keine signifikanten Nachteile gegenüber den Ausschnittsimulationen ASH_WA und ASP_WA, weshalb diese Art der Vernetzung für die Untersuchungen genutzt werden kann.

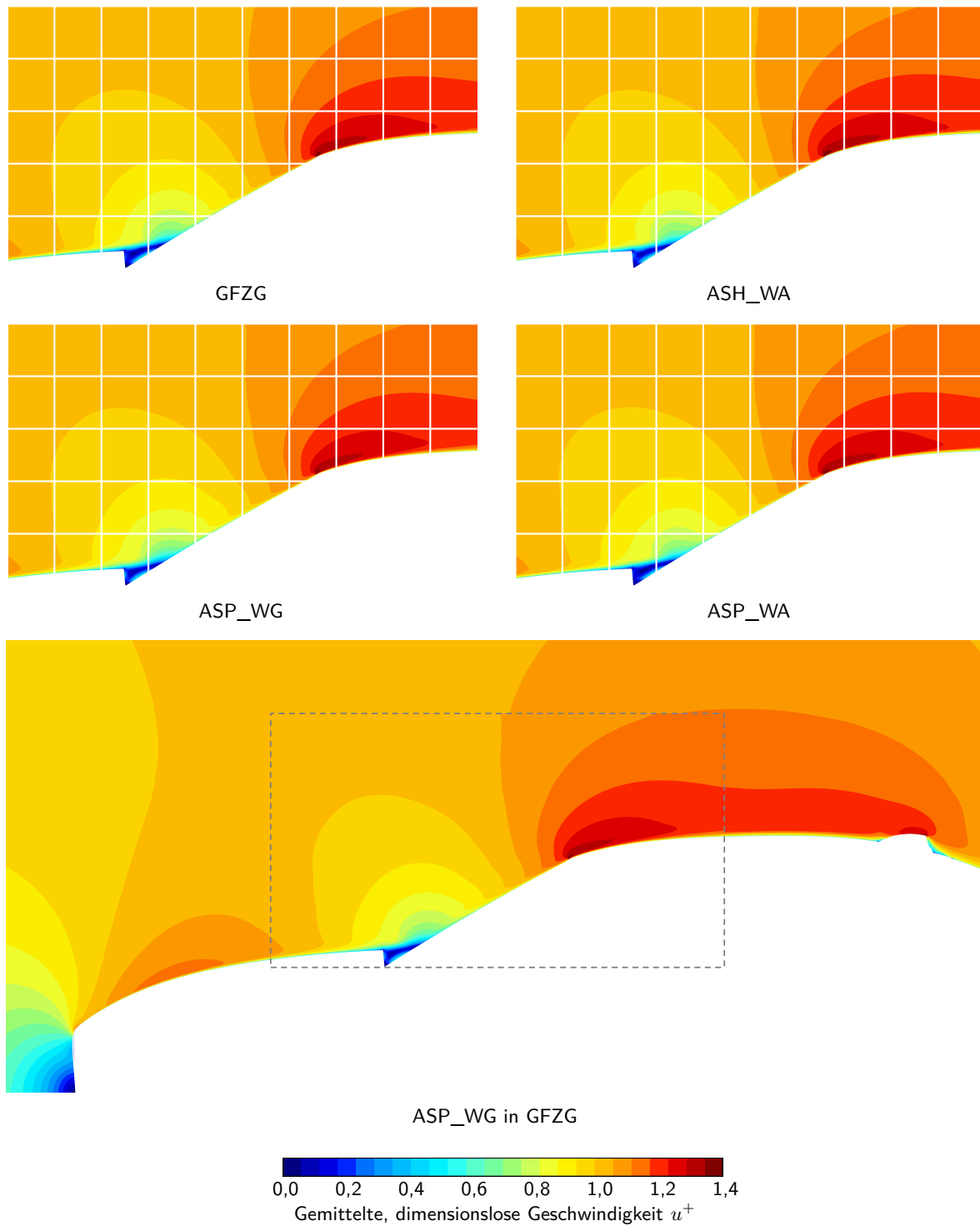


Abbildung 5.24: Gemittelte, dimensionslose Geschwindigkeit in der Fahrzeugmittelebene für die Simulationen am Gesamtfahrzeug und den drei Fahrzeugausschnitten

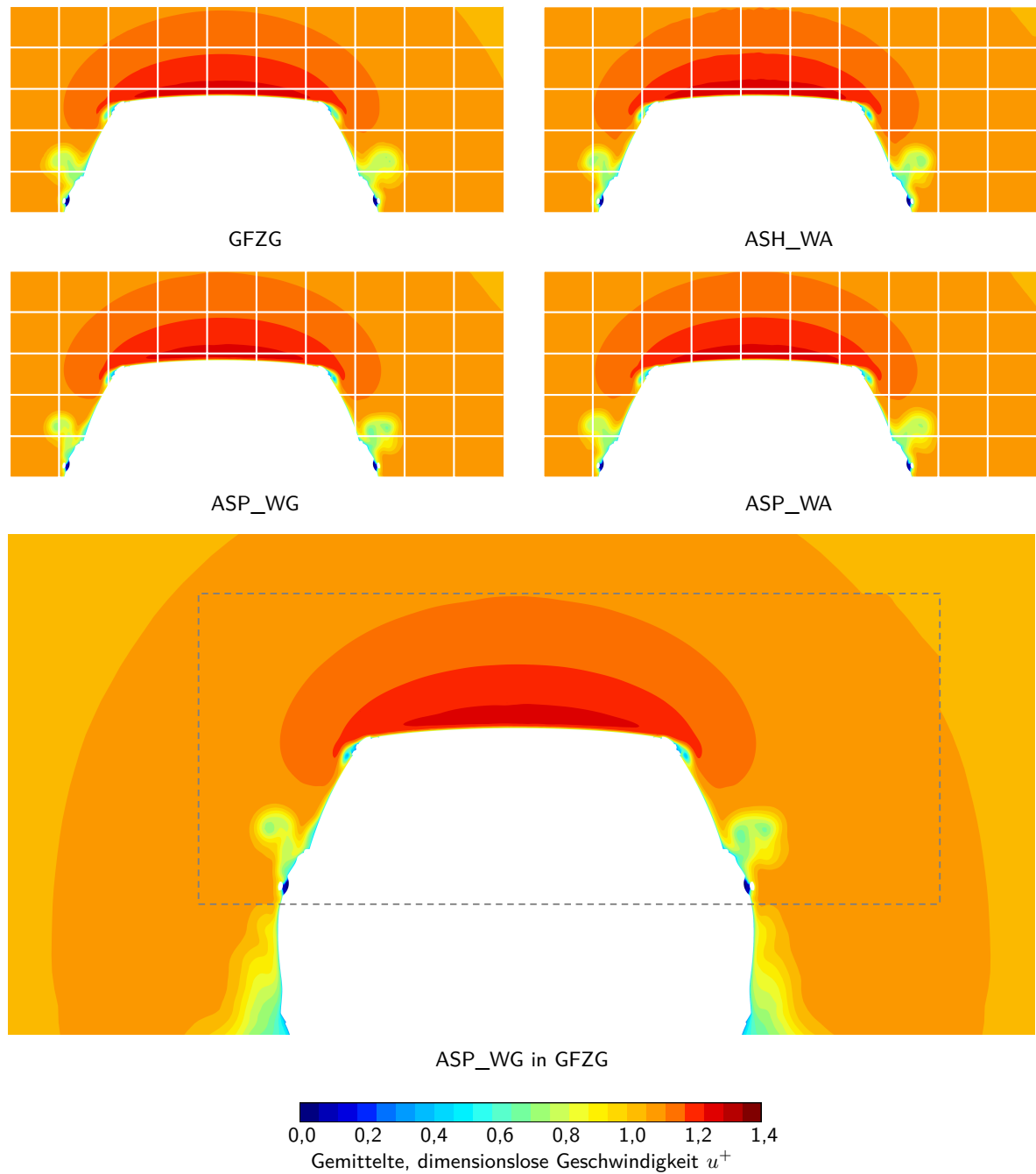


Abbildung 5.25: Gemittelte, dimensionslose Geschwindigkeit in der Ebene $x = 1,50$ m für die Simulationen am Gesamtfahrzeug und den drei Fahrzeugausschnitten

Scheibenwischermethodik

Ein wesentlicher Punkt zur Simulation der Sichtfreihaltung an Personenkraftwagen ist die realistische Abbildung der Scheibenwischerbewegung. Im ersten Abschnitt des Kapitels werden das entwickelte Validierungsexperiment mit den einzelnen Komponenten, der Versuchsaufbau im Umweltwindkanal sowie der Simulationsaufbau mit den bewegten Netzen und den Mehrphasenmodellen beschrieben. Nach einer kurzen, rein aerodynamischen Betrachtung zur Scheibenwischerbewegung und dem Übergang von einer Gesamtfahrzeugsimulation zu einer Ausschnittsimulation wird im letzten Teil des Kapitels die Scheibenwischermethodik validiert. Dazu werden neben einem qualitativen Vergleich der Front- und Seitenscheibenbenetzung auch quantitative Größen wie der über die Frontscheibe abfließende Wasseranteil oder die mittlere Rinnsalfließgeschwindigkeit gegenübergestellt. Die Validierung wird für verschiedene A-Säulenvarianten und Luftströmungsgeschwindigkeiten durchgeführt.

6.1 Validierungsexperiment mit Wasseraustrittskörper auf der Fahrzeugdachkante

Bei einer nachgestellten Regenfahrt im Umweltwindkanal werden fein zerstäubte Wassertropfen über vier Sprayer am Regenrack hinter der Windkanaldüse eingebracht und mit der Luftströmung zum Fahrzeug transportiert. Dort interagieren sie mit der Oberfläche und bleiben teilweise als Tropfen zurück oder akkumulieren zu Rinnsalen und Filmen. Die exakte auf die Fahrzeugoberfläche treffende und zurückbleibende Wassermenge sowie deren örtliche Verteilung sind unbekannt und lassen sich daher nicht direkt in einer Simulation vorgeben. Zudem sind die Einflussfaktoren an einer komplexen Geometrie, wie der Fahrzeugaußenhaut, sehr vielfältig. Aus diesem Grund wurde in Abschnitt 5.2 das Filmmodell anhand eines generischen Grundlagenexperiments untersucht, bei dem die Randbedingungen und Strömungseigenschaften kontrolliert werden können. Zur Erforschung von Mehrphasenmodellen an einer Fahrzeugaußenhaut und zur Validierung der entwickelten Scheibenwischermethodik ist ein Experiment mit definierten, in die Simulation übertragbaren Wassereintrittsbedingungen erforderlich. Das umgesetzte Konzept besteht aus einem konstruierten und gefertigten Wasseraustrittskörper, der auf der Fahrzeugdachkante des Versuchsfahrzeugs befestigt wird und einen gleichmäßigen und definierten Wassereintrag auf die Frontscheibe gewährt.

6.1.1 Versuchsfahrzeug

Das für die Versuche mit dem Wasseraustrittskörper verwendete Fahrzeug ist eine serien-nahe BMW 3er Limousine der sechsten Generation (BMW F30). Diese Generation wurde von 2011 bis 2019 produziert und zählt zum Fahrzeugsegment der Mittelklasse. Im Vergleich zum Serienstand besitzt das Versuchsfahrzeug modifizierte A-Säulen, eine nach vorne versetzte Windschutzscheibe und ein angepasstes Fahrzeugdach. Aufgrund der veränderten Windschutzscheibe mussten zusätzlich die Scheibenwischerarme angepasst werden, um bei der Wischbewegung eine Kollision mit den umliegenden Bauteilen zu vermeiden. Zugleich ist beim Umbau der beifahrerseitige Außenspiegel entfallen. Das Versuchsfahrzeug eignet sich besonders für die Untersuchungen in dieser Arbeit, da die A-Säulengeometrie modular ausgewechselt und die Komplexität damit in gewissen Grenzen variiert werden kann.

6.1.2 Wasseraustrittskörper

Der in Abbildung 6.1 dargestellte Wasseraustrittskörper ist entlang der Dachkante des Fahrzeugs geformt. Er ist etwa 105 mm hoch, 115 mm tief und 1100 mm breit. Über einen Schaum zwischen Fahrzeugdach und Austrittskörper wird die Dachkrümmung in z -Richtung nivelliert, sodass der Wasseraustrittskörper über der Breite auf einem konstanten Höhenniveau liegt. Der Wasseraustrittskörper ist so ausgelegt, dass das Wasser im Inneren beruhigt wird und an der vorderen Kante durch Gravitation getrieben herausfließt. Mittels einer Pumpe wird das Wasser aus einem auf dem Fahrzeugdach platzierten Wassertank angesaugt, wobei der Wassertank kontinuierlich über eine Schlauchleitung mit neuem Wasser-Fluoreszenzmittel-Gemisch befüllt wird. Er besitzt einen Überlauf, um den Wasserpegel im Tank auf einem konstanten Niveau zu halten, weil sich gezeigt hat, dass der Pegel des Wassertanks den aus dem Wasseraustrittskörper fließenden Wassermassenstrom beeinflusst. Während des Versuchs wird die Pumpe

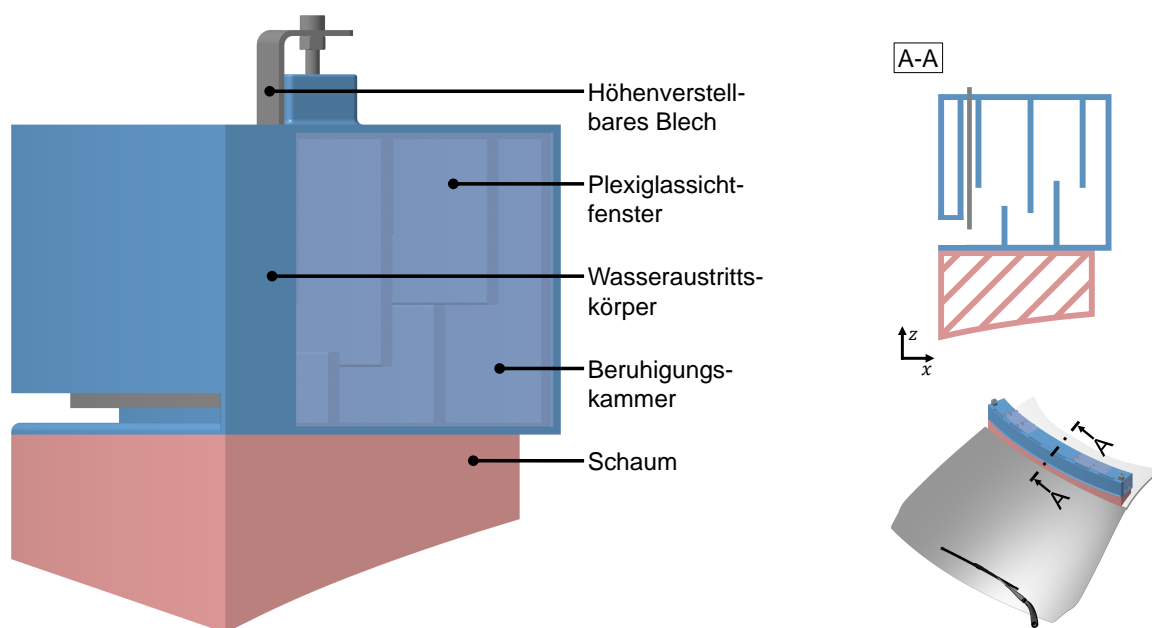


Abbildung 6.1: Konstruktion des Wasseraustrittskörpers mit Beruhigungskammern

nicht betrieben, da nur sehr geringe Massenströme benötigt werden und die Flüssigkeit alleine durch den hydrostatischen Druck getrieben wird. Hinter der Pumpe befindet sich eine Drossel zur weiteren Reduktion der zufließenden Flüssigkeitsmenge, die über ein Verteilerstück an sechs gleichmäßig entlang der Breite verteilten Stellen dem Wasseraustrittskörper zugeführt wird. Im Inneren des Körpers befinden sich mehrere Bleche, die das Wasser beruhigen. Das einströmende Wasser trifft auf ein Beruhigungsblech und sammelt sich in der hinteren Kammer bis der Wasserstand das nächste Blech übersteigen kann. In der nächsten Kammer wird das Wasser erneut beruhigt und fließt anschließend über das vorderste Blech auf die Austrittsebene. Kurz vor dem Austritt aus dem Körper kann über ein höhenverstellbares Blech die Spalthöhe eingestellt werden. Von der Austrittsebene fließt das Wasser weiter über einen definierten Radius und die vertikale Wand des Ausgleichsschaums bis es auf der Frontscheibe aufkommt.

Die Einstellung eines gleichmäßigen z -Niveaus auf der Austrittsebene des Wasseraustrittskörpers stellt eine besondere Herausforderung dar. Um die Toleranzen des im Stereolithografie-3D-Druck hergestellten Wasseraustrittskörpers zu korrigieren, wird das gesamte Fahrzeug inklusive dem befestigten Wasseraustrittskörper auf eine Ausrichtmaschine gestellt. Mit einer Fräsmaschine wird das vorderste Beruhigungsblech sowie die Austrittsebene nachgefahren, um Unterschiede im z -Niveau auszubessern. Während der Messungen wird das Versuchsfahrzeug auf vier höhenverstellbaren Stützen aufgebockt, um mögliche Höhenunterschiede durch einen geänderten Reifendruck oder das Feder-Dämpfer-System des Fahrzeug auszuschließen. Weiterhin besteht dadurch die Möglichkeit einer iterativen Feinjustierung des z -Niveaus. Dieser Ausgleichvorgang ist bei jedem Versuchsaufbau erneut durchzuführen.

Trotz der aufwendigen Auslegung und Vorbereitung tritt die beförderte Flüssigkeit nicht immer flächig über die vorderste Kante der Austrittsebene auf die Frontscheibe. Insbesondere bei geringen Wassermengen und hohen Kontaktwinkeln bilden sich vermehrt Rinnsale anstatt eines flächigen Films. Der Grund liegt mitunter an der Oberflächenspannung, die dafür sorgt, dass sich das Fluid zunächst an der Kante aufstaut bis eine kritische Flüssigkeitsmenge erreicht ist und das Fluid an einer oder mehreren Stellen aufbricht. Durch Erzwingen einer kleineren Oberflächenspannung kann das Aufstauen an der Kante verringert werden, allerdings ändert sich dadurch das gesamte Flüssigkeitsverhalten, weshalb dieser Weg ausgeschlossen wird. Durch manuelle Vorbenetzung der gesamten Austrittsfläche und des Schaums kann der flächige Austritt verbessert werden. Dazu wird ein vollständig durchnässtes Tuch über den Austrittskörper gelegt. Das Tuch nimmt das Wasser der Austrittsebene auf und transportiert es zur Frontscheibe. Durch dieses Verfahren wird einerseits der Einfluss des ungleichmäßigen Übertretens an der vordersten Kante der Wasseraustrittsfläche reduziert und andererseits gewährleistet, dass die Austrittskante und der Schaum stets benetzt sind.

6.1.3 Wasserfang- und -führungskonstruktion

Die Bestimmung von quantitativen Größen für einen Vergleich von Experimenten und Simulationen zum EWM ist nach wie vor anspruchsvoll, jedoch wird dadurch erst eine hochwertige Validierung ermöglicht. In dieser Arbeit wird das über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste abfließende Wasser mithilfe der mehrstufige Konstruktion in Abbildung 6.2 aufgefangen. Die erste Stufe bildet ein an der unteren Kante der Frontscheibe angebrachtes Metallblech

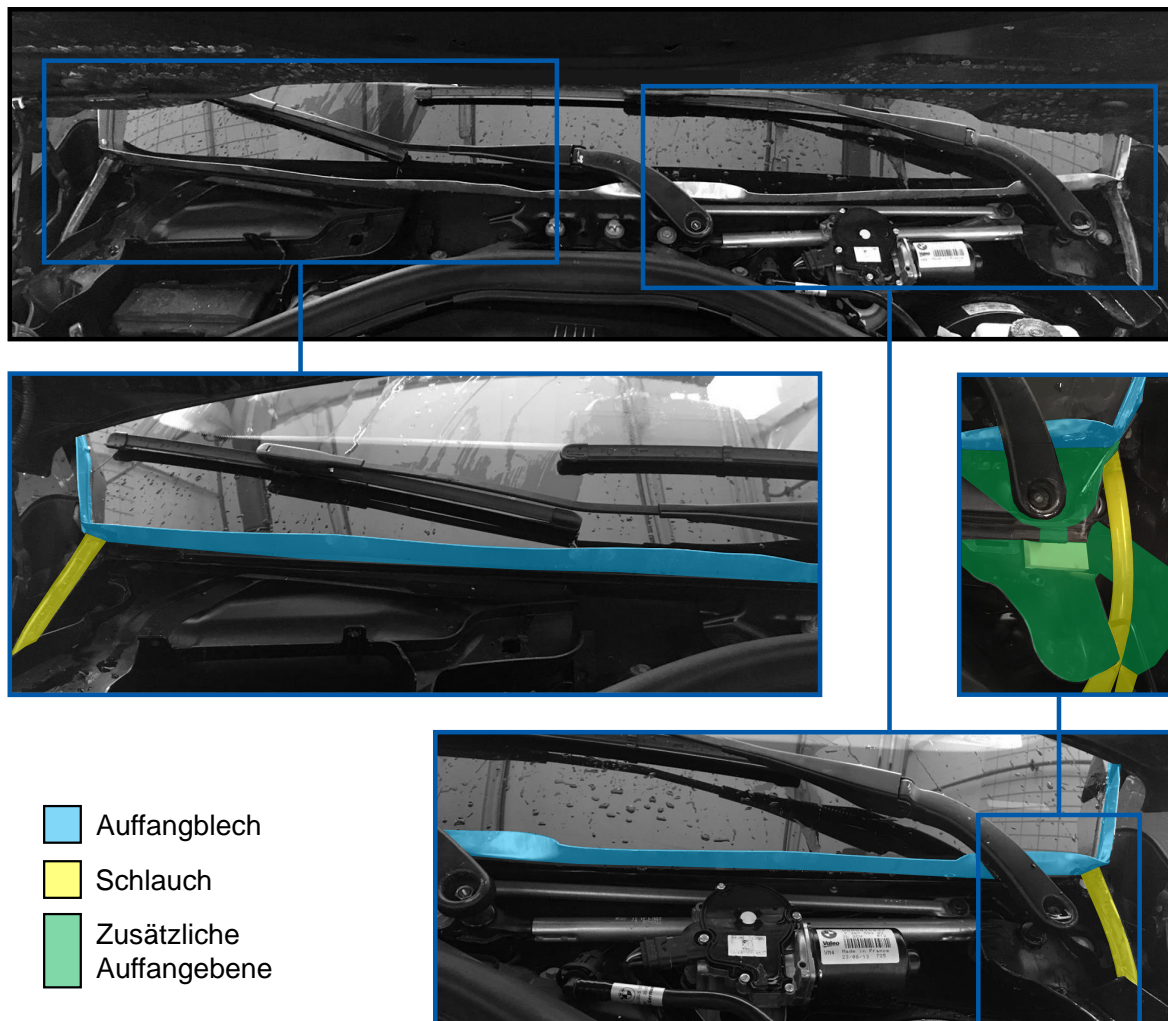


Abbildung 6.2: Wasserfang- und -führungskonstruktion des über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste abfließenden Wassers

(blau hervorgehoben in Abbildung 6.2), das analog zur Scheibenkrümmung geformt ist und eine Höhe von etwa 25 mm aufweist. Durch die versetzte Frontscheibe am Versuchsfahrzeug bewegen sich die Scheibenwischerarme mit einem geringen Abstand über die Windschutzscheibe, weshalb die lokale Höhe des Auffangblechs stellenweise stark reduziert werden musste, um eine reibungsfreie Scheibenwischerbewegung sicherzustellen (siehe Abbildung 6.2). Das aufgefangene Wasser wird von der Fahrzeugmitte zu beiden Seiten und anschließend über Schläuche (gelb hervorgehoben in Abbildung 6.2) durch den jeweiligen Radkasten umgeleitet. Sollte das ankommende Wasser zeitweise die Blechhöhe übersteigen, wird es in einer zweiten Auffangebene (grün hervorgehoben in Abbildung 6.2) gesammelt und ebenfalls über Schläuche abgeführt. Diese Konstruktion ermöglicht, die über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste abfließende Wassermenge pro Zeiteinheit zu messen. Mit Kenntnis des Eingangsmassenstroms in den Wasseraustrittskörper lässt sich durch Differenzbildung der über die A-Säulen trans-

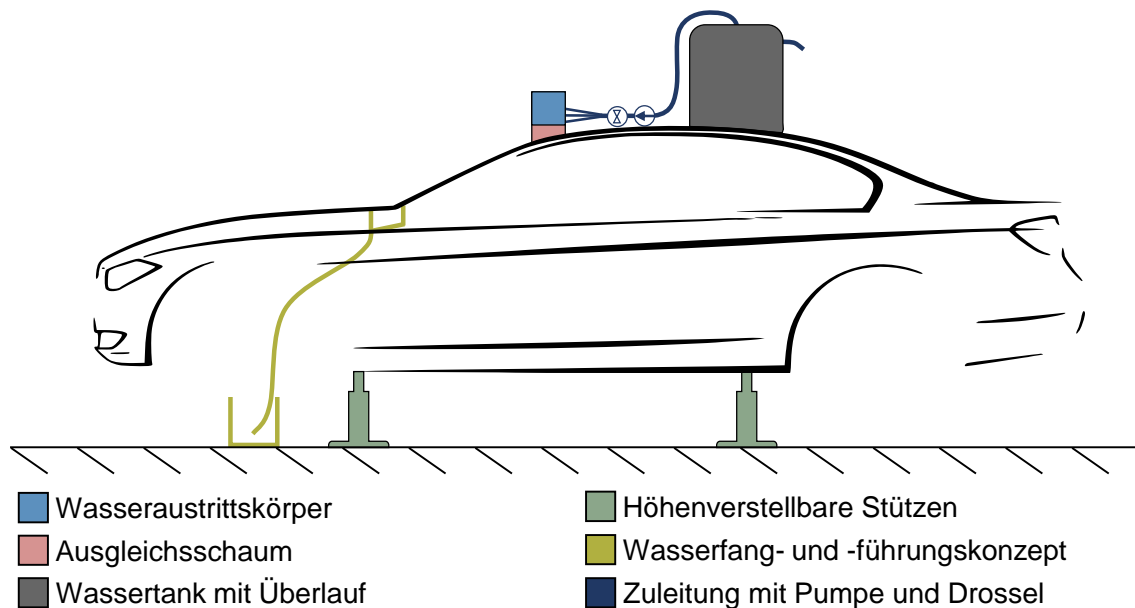


Abbildung 6.3: Schematischer Versuchsaufbau des Fahrzeugs mit Wasseraustrittskörper auf der Fahrzeugdachkante

portierte Wassermassenstrom bestimmen. Anhand dieser Größen lässt sich überprüfen, ob die entwickelte Scheibenwischermethodik die Physik und die Wasserverteilung korrekt abbildet. Eine schematische Skizze des Versuchsaufbaus wird in Abbildung 6.3 gezeigt.

6.1.4 Versuchsaufbau im Umweltwindkanal

Die Messungen mit dem umgebauten Versuchsfahrzeug werden im Umweltwindkanal durchgeführt. Der in Abschnitt 4.1.2 beschriebene Kanal ist wasserfest und kann abgedunkelt werden, wodurch eine Beeinflussung durch störende Lichtquellen bei Verwendung der Fluoreszenzmethode ausgeschlossen wird. Die Fluoreszenzmethode wird zur Sichtbarmachung des Wassers und Abschätzung der Filmhöhe eingesetzt. Im Umweltwindkanal werden die fest verbauten UV-Strahler und die Kamera über der Windkanaldüse für die Aufnahme der Fahrzeugfront sowie ein verfahrbares Gestell mit UV-Strahlern und zwei weiteren Kameras für die seitliche Aufnahme des Versuchsfahrzeugs verwendet. Bei Bedarf kann der Aufbau mit einer Luftanströmung überlagert werden.

Wie zuvor beschrieben wird das Versuchsfahrzeug auf vier individuell höhenverstellbaren Stützen aufgebockt. Beim Versuchsaufbau muss sichergestellt sein, dass diese Metallstützen einen sicheren Stand haben und nicht auf Bodenkomponenten, wie den Antriebswalzen oder beweglichen Rollläden, platziert werden. Die Fahrzeugposition im Plenum ist daher nicht beliebig wählbar. Die Intensität des Anregungslichtes, die eine reziproke Proportionalität zum Quadrat des Abstandes aufweist, kann über einen Drehregler pro Lichtquelle eingestellt werden, sodass eine gleichmäßige Ausleuchtung des Versuchsobjekts erzielt wird. Da die austretende Wassermenge sehr sensitiv auf Änderungen des Füllstands im Wassertank und -austrittskörper reagiert, wird zur regelmäßigen Kontrolle des Wasserstands auf ein Abkleben der Zuleitungen



Abbildung 6.4: Versuchsaufbau im Umweltwindkanal

und der Wasserbehälter mit schwarzer Folie (zur Minimierung des in Abschnitt 4.2.2 erwähnten Effekts durch Photobleichung) verzichtet. Abbildung 6.4 zeigt den Versuchsaufbau am realen Fahrzeug im UWK.

6.2 Simulationsaufbau zur Scheibenwischerbewegung

Scheibenwischer sind ein essentieller Bestandteil eines Fahrzeugs zur Verbesserung der Sicht durch die Windschutzscheibe während einer Regenfahrt. Die Befreiung der Scheiben von einer Wasserbenetzung ist anhängig von der Gestalt des Scheibenwischerblatts und -arms sowie dem Zusammenspiel mit der Wasser- und der Luftphase. Die Überprüfung der Scheibenwischerfunktion findet hauptsächlich experimentell im Umweltwindkanal bei nachgestellter Regenfahrt statt. Dabei werden neben der gesamtheitlichen Reinigungsleistung auch Aspekte wie Wasserrückzugverhalten an der A-Säule, Scheibenwischerrattern, Hochgeschwindigkeit-Qualität und Overspray untersucht [46, 79]. Eine frühzeitige, simulative Analyse kann helfen, die negativen Effekte der Scheibenwischer zu reduzieren oder sogar vollständig abzustellen. Dazu wird eine Methodik zur Abbildung der Scheibenwischerbewegung in STAR-CCM+ implementiert. Die korrekte Abbildung der Bewegung ist von entscheidender Bedeutung, da diese einen sichtbaren Effekt auf die lokalen Strömungsfelder nahe der Scheibenwischer aufweisen und sich von den Strömungsfeldern einer Simulation mit statischer Scheibenwischergeometrie an der gleichen Position unterscheiden [79].

6.2.1 Übertragung der Scheibenwischerbewegung in die Simulation

Zur Erzeugung der Scheibenwischerbewegung sind 360°-Rundläufermotoren und Reversiermotoren am weitesten verbreitet. Während bei den teureren Reversiermotoren (Einsatz in den oberen Fahrzeugklassen) die Drehrichtung für den Hoch- bzw. Herunterlauf durch Ansteuerungselektronik des Elektromotors geändert werden kann, rotieren Rundläufermotoren

(Einsatz in den unteren Fahrzeugklassen) stets in die gleiche Richtung. Die charakteristische Bewegung der Scheibenwischer wird hierbei über ein Wischergetriebe (z. B. Cranck-Rocker-Mechanismus) realisiert. Auch die gleichlaufenden Scheibenwischer des Versuchsfahrzeugs werden durch einen 360° Rundläufer angetrieben und mittels Hebelgetriebe in die finale Bewegung überführt. Die Scheibenwischergeschwindigkeit nimmt in guter Annäherung den Verlauf einer Sinusschwingung an mit den geringsten Geschwindigkeit an den Wendepositionen nahe der Motorhaube und der A-Säule.

Bedingt durch die komplexe Gestalt der Windschutzscheibe und der Scheibenwischerkinematik stellt die Abbildung der Bewegung in einer Simulation nach wie vor eine Herausforderung dar. Für den Aufbau einer Scheibenwischersimulation empfiehlt sich die Verwendung einer möglichst aktuellen Version von STAR-CCM+. Das hat den Hintergrund, dass zum einen die Vorgabe einer komplexen Bewegung ab Version 13.04 deutlich komfortabler ist und zum anderen im Bereich der Mehrphasenströmungen stetig weitere Verbesserungen (beispielsweise das Mehrschrittverfahren bei der Volume-of-Fluid-Methode) implementiert werden. Der Grundaufbau entspricht einer reinen Aerodynamiksimulation, wie sie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben und in [35, 84] validiert wurde, wobei die Geometrie im Bereich der A-Säule ohne die üblichen Vereinfachungen abgebildet und die Oberfläche noch detaillierter in verschiedene PID unterteilt wird. Die feinere Unterteilung bietet umfangreichere Möglichkeiten bei der Erzeugung einer geschickten Vernetzung und der Vorgabe von individuellen Oberflächeneigenschaften.

Der primäre Ansatz zur Netzbewegung bei der Scheibenwischersimulation basiert auf Chimera-Gittern, wobei dieser mit dem Ansatz der Netzverformung erweitert wird, um das Scheibenwischerblatt an die Krümmung der Frontscheibe anzupassen (vgl. Darstellung von Netzbewegungen in Abschnitt 4.5). Dank der geschickten Kombination beider Ansätze kann auf eine regelmäßige, rechenintensive Neuvernetzung und Interpolation der Simulationsregion verzichtet werden. Gleichzeitig lassen sich große Bewegungen entlang komplexer Oberflächen realisieren. Für diesen Ansatz wird pro bewegtem Bauteil eine separate Overset-Region benötigt. Die Begrenzungsflächen der Overset-Region werden als Interface definiert und so platziert, dass zwischen ihnen und den umliegenden Wänden stets mindestens vier Volumenzellen liegen. Gleichzeitig müssen am Interpolationsinterface möglichst gleich große Volumenzellen in der Overset-Region und der Hintergrundregion vorliegen, um die Fehler bei der Interpolation zu minimieren. Die wandnächste Prismenschicht auf der Frontscheibe darf nicht zu flach gestaltet werden, damit bei der Netzverformung keine schlechten Zellen entstehen, die zu einem Abbruch der Simulation führen.

Die Daten zur Übertragung der Scheibenwischerbewegung in die CFD-Software werden aus technischen Zeichnungen und vorhandenen CAD-Modellen ermittelt. Die Scheibenwischerbewegung kann je nach Fahrzeugmodell variieren und wird nachfolgend am Beispiel des Versuchsfahrzeugs beschrieben. In den Drehachsen der beiden Scheibenwischerarme werden jeweils Koordinatensysteme erzeugt, deren x -Achse die Drehachse darstellt. Die hergeleiteten Vorschriften für die Winkelgeschwindigkeiten der Scheibenwischerarme werden in den extra erzeugten Scheibenwischer-Koordinatensystemen als Funktion für die Festkörperbewegung vorgegeben. Sie besitzen vereinfacht ausgedrückt die Form einer Sinusschwingung (vgl. Gl. (6.1)).

$$\dot{\varphi}_{FS/BS} = \tilde{A}_{FS/BS} \sin(2\pi ft) \quad (6.1)$$



Abbildung 6.5: Unterteilung der Overset-Region eines Scheibenwischers zur realistischen Abbildung der Scheibenwischerbewegung und Definition der Randbedingungen für die Netzverformung in der Simulation

Darin ist $\tilde{A}_{FS/BS}$ die Amplitude, die den Winkel des überwischten Ausschnitts auf der Frontscheibe beinhaltet, f die Frequenz der Bewegung und t die Zeit. Die Frequenz ist abhängig von der gewählten Geschwindigkeitsstufe des Scheibenwischers. In Stufe 1 (Normalstufe, keine Intervallschaltung) dauert ein Scheibenwischerzyklus genau 1,5 s.

Zur Vorgabe der Bewegungsvorschrift wird die Overset-Region der Scheibenwischer in die in Abbildung 6.5 dargestellten Bereiche unterteilt. Die in gelb, blau und rot eingefärbten Begrenzungsflächen werden als OSM-Interface definiert. Die seitliche Berandung ist nochmals in einen frontscheibennahen (rot) und -fernen (blau) Bereich unterteilt, um die Bewegungs- und Verformungsvorgabe noch realistischer umsetzen zu können. Die gelben und blauen Flächen werden mit der ermittelten Festkörperbewegung beaufschlagt, wobei sie sich zusätzlich nur parallel zur Frontscheibe der Hintergrundregion bewegen dürfen. Der grün-farbige Frontscheibenausschnitt der Overset-Region gleitet auf der Frontscheibe und verformt sich dabei adäquat. Sollte sich der Frontscheibenausschnitt zu Beginn der Simulation nicht mit der Frontscheibe der Hintergrundregion decken, kann zur Initialisierung bereits ein Netzverformungsschritt durchgeführt werden. Da der Frontscheibenausschnitt der Overset-Region in der Realität ein Stück der unbewegten Frontscheibe darstellt, wird in der Simulation ein ebenfalls statisches Verhalten erzwungen. Wie in Abbildung 6.6 zu sehen, weist die gesamte Frontscheibe inklusive der mitbewegten Scheibenausschnitte der beiden Overset-Regionen keine effektive Geschwindigkeit auf. Dies ist wichtig, um bei einer Mehrphasensimulation ein Mitbewegen der auf dem Frontscheibenausschnitt haftenden Flüssigkeit zu vermeiden. Der rote Berandungsring in Abbildung 6.5 erhält die Floating-Randbedingung, d. h. er verformt sich in Abhängigkeit des interpolierten Bewegungsvektorfeldes. Sowohl dem Scheibenwischerarm als auch dem -blatt (dunkelblau) wird ebenfalls die Floating-Randbedingung zugewiesen. Aufgrund der seitlichen, parallel zur Oberfläche bewegten Berandungsflächen kommt es zu keiner unnatürlichen Verzerrung. Alternativ kann der Scheibenwischerarm und der obere Bereich des Wischerblattes mit einer parallel zur Frontscheibe der Hintergrundregion vorgegebenen Festkörperbewegung belegt werden, was jedoch zu geringen Performanceeinbußen im Vergleich zur Floating-Randbedingung führt.

Als Interpolationsverfahren wird die robuste, lineare Interpolation gewählt. Diese wird für bewegte Overset-Regionen empfohlen und führt selbst bei hohen Gradienten in dem Interpolationsbereich zu einem guten Ergebnis (vgl. Abschnitt 4.5.3). Für den Fall, dass mindestens eine Begrenzungsfläche der Overset-Region auf einer Wand der Hintergrundregion liegt, ist die Overset-Topologie explizit zu definieren. Die Overset-Topologie wird entlang der positiven z -Achse des globalen Koordinatensystems definiert. Sie bestimmt die Beziehung der Regionen zueinander und entscheidet zusammen mit der Priorität der beiden Regionen,

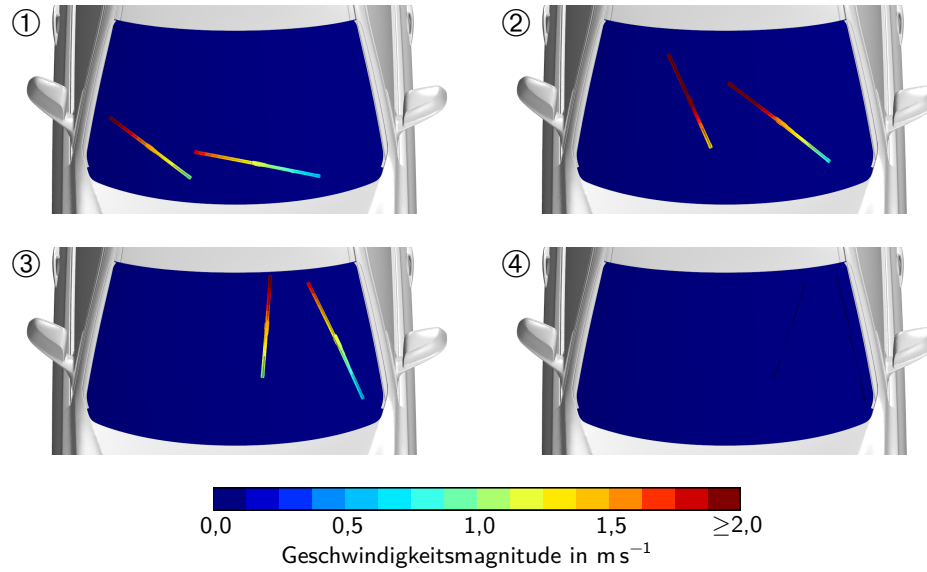


Abbildung 6.6: Bilderserie zur Geschwindigkeitsmagnitude der Scheibenwischer und der Frontscheibe.

welche Region als Hintergrundregion und welche als Overset-Region behandelt wird. Dies beugt Fehler beim Entfernen von Zellen in den überlappenden Netzregionen vor (siehe Hole-Cutting-Algorithmus) [145].

Nach der Initialisierung ist der Status der Volumenzellen in der Hintergrundregion und den Overset-Regionen zu kontrollieren. Dabei werden die im aktuellen Zeitschritt aktiven und deaktivierten Zellen sowie die Empfängerzellen der Interpolation ersichtlich. Hierbei sind an der Interpolation beteiligte Empfängerzellen blau, aktive Zellen grün und inaktive Zellen rot dargestellt. Nahe der Begrenzungsflächen der Overset-Region liegen die an der Interpolation zwischen den beiden Regionen beteiligten Zellen, der OSM-Bereich in der Hintergrundregion ist inaktiv, während die restlichen Zellen der Hintergrundregion und der Overset-Region aktiv sind (vgl. Abbildung 6.7).

6.2.2 Erweiterung zur Mehrphasensimulation

Für die Mehrphasensimulation wird das hybride Fluidfilm-VOF-Modell gewählt. Dabei wird das Fluidfilmmodell mit der Volume-of-Fluid-Methode gekoppelt. Für VOF werden die beiden eulerschen Phasen Luft und Wasser und für das Filmmodell die Wasser-Filmphase erzeugt. Der Übergang von einem in das andere Modell erfolgt sobald die pro Oberfläche individuell definierbare Grenze α_{trans} über- bzw. unterschritten wird. Ist der Wasservolumenanteil einer Zelle größer als die definierte Grenze α_{trans} , wird mit VOF gerechnet, ist der Wasservolumenanteil kleiner als die Grenze, wird das Fluidfilmmodell verwendet. Eine ausführlichere Beschreibung ist in Abschnitt 4.4.4 gegeben. Neben dem Mehrphaseninteraktionsmodell des aufgelösten Fluidfilms, das für das hybride Mehrphasenmodell erforderlich ist, wird jeweils für die Phasengrenze zwischen Luft und Wasser sowie zwischen Luft und Fluidfilm die Oberflächenspannung aktiviert. Dies ermöglicht die Berücksichtigung von Oberflächenspannungseffekten durch Vorgabe von Kontaktwinkeln auf den verschiedenen Oberflächen.

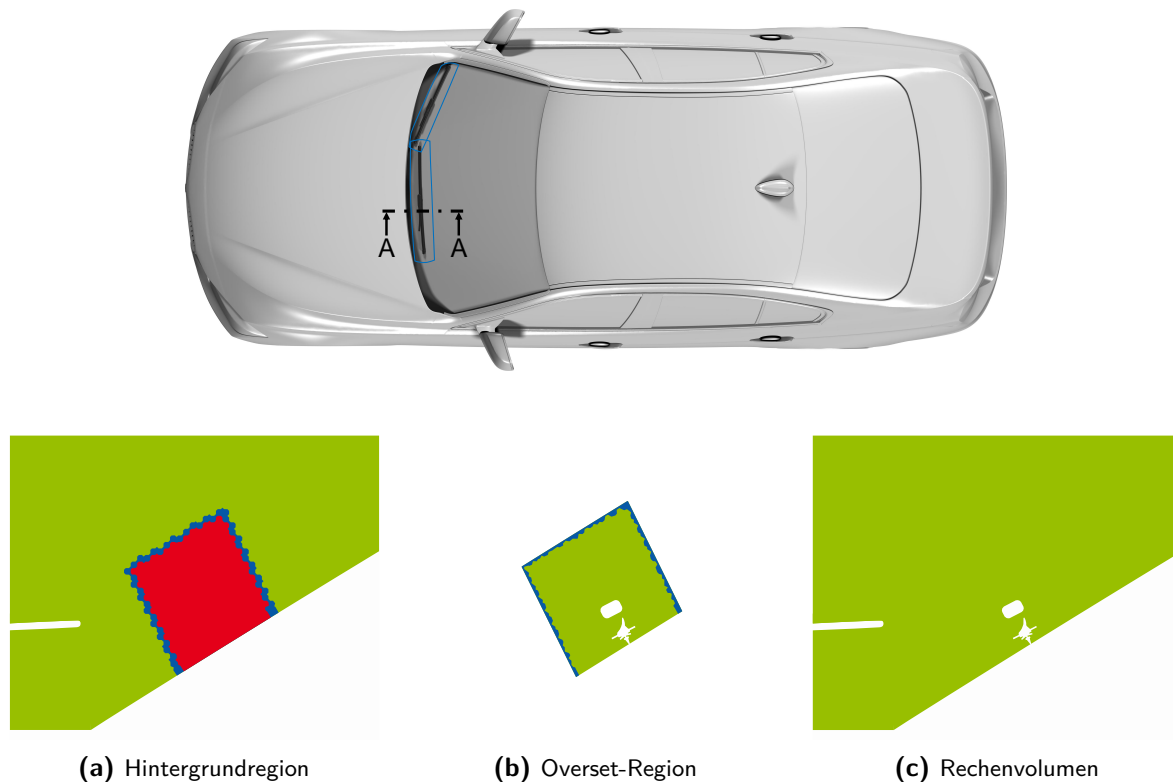


Abbildung 6.7: Overset-Mesh-Status am Beispiel einer Schnittebene durch die Hintergrund- und die fahrerseitige Scheibenwischerregion an der eingezeichneten Position bei A-A. Die Hintergrundregion (a) wird mit der Overset-Region (b) des Scheibenwischers zum Rechenvolumen (c) zusammengefasst (grün: aktive Zellen, rot: inaktive Zellen, blau: Interpolationszellen)

Eine Besonderheit beim Filmmodell ist, dass im Vorhinein auf jeder Oberfläche, auf der ein Film erwartet und benötigt wird, eine Shell erzeugt werden muss. In dieser extra erzeugten Region werden die Gleichungen des Fluidfilmmodells berechnet und die Geschwindigkeitskomponenten sowie die Filmhöhe gespeichert. Die Luftströmung wird durch den Film nicht beeinflusst, allerdings beeinflusst sie das Filmverhalten, sofern die nötigen Modelle wie beispielsweise die Formwiderstandskraft aktiviert sind. Abbildung 6.8 zeigt die Simulationsdomain am Beispiel des Wasseraustrittskörpers mit der erzeugten Shell für das Filmmodell in orange sowie deren Randbedingungen. Auf den orange hervorgehobenen Flächen wird ein Film berechnet. Rote Kanten repräsentieren einen Filmauslass, grüne Kanten einen Masseneinlass und blaue Kanten werden als Wand behandelt. Die schwarze, um den Scheibenwischer laufende Linie auf der Frontscheibe repräsentiert die Schnittstelle zwischen der Hintergrundregion und der Scheibenwischerregion. Am Wassereinlass wird – ähnlich dem Verfahren zur Erzeugung eines Kontaktwinkelteppichs in Abschnitt 5.2 – eine zufällige Schwankung des Massenstroms entlang der Einlasskante in MATLAB berechnet und als Randbedingung in die Simulation übertragen. Um in Summe mit dem gleichen Wassermassenstrom wie im Validierungsversuch einzuströmen, wird in einem Korrekturverfahren in jeder einzelnen Zelle der zellgrößengewichtete Anteil der Abweichung zwischen dem Massenstrom des Experiments und dem resultierenden Gesamtmassenstrom aller berechneten Einzelmassenströmen hinzuaddiert.

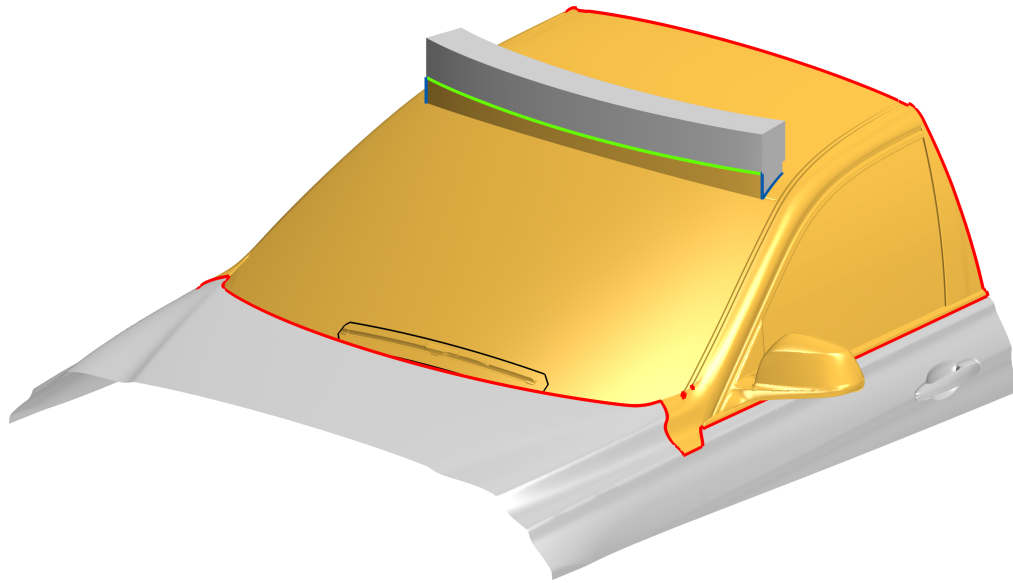


Abbildung 6.8: Simulationsdomain am Beispiel des Wasseraustrittskörpers mit orange hervorgehobener Shell für das Filmmodell sowie deren Randbedingungen (rot: Filmauslass, grün: Filmeinlass, blau: Wand und schwarz: OSM-Interface der Shell)

Nach Erzeugung der Shell für die Hintergrundregion sowie die beiden Scheibenwischerregionen werden diese analog zu den Fluidregionen über OSM-Interfaces miteinander verknüpft. Für eine Scheibenwischersimulation mit zwei Scheibenwischern liegen im Allgemeinen sechs OSM-Interfaces vor: drei für die Fluidregionen und drei für die Shellregionen. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Overset-Region stets die höhere Priorität besitzt, um im Verschneidungsprozess die korrekten Regionsbereiche zu behalten. In den Shellregionen wird die gleiche Overset-Topologie wie in den zugehörigen Fluidregionen gewählt. Um die Shellregionen passend zu den Fluidregionen mitzubewegen, werden die bewegten Shellregionen mit den Overset-Regionen verknüpft und den bei Erzeugung der Shell automatisch generierten Interfaces die gleichen Netzverformungsspezifikationen wie den Eltern-Flächen zugewiesen. Da eine Shell nur auf der Oberfläche existiert, entfällt die zusätzliche Vorgabe an den Begrenzungsflächen der Overset-Region. Bei den Frontscheibenausschnitten ist erneut darauf zu achten, dass neben der Bedingung zum Gleiten auf der Frontscheibe der Hintergrundregion ein statisches Verhalten abgebildet wird.

6.2.3 Überblick der verwendeten Modelle

Bei einer mehrphasigen Scheibenwischersimulation werden mehrere Modelle miteinander gekoppelt. Tabelle 6.1 fasst die verwendeten, physikalischen Modelle zusammen. Im Euler-Mehrphasenmodell werden je eine Phase für Wasser und eine für Luft angelegt.

- Eulerphase Wasser
 - flüssig (Dichte, Viskosität)
 - konstante Dichte
 - turbulent

Tabelle 6.1: Gewählte Modelle bei der Scheibenwischersimulation

Modell	Einstellung
Raum	Dreidimensional
Zeit	Implizit Instationär
Material	Euler-Mehrphasen
Euler-Mehrphasenmodell	Volume-of-Fluid
Strömung	Segregated Flow
Strömungsart	Turbulent
Strömungslöser	Improved Delayed Detached Eddy Simulation
Turbulenzmodell	k - ω -SST-Turbulenzmodell
Wandbehandlung	All- y^+ -Wandbehandlung
Mehrphaseninteraktionsmodelle	Aufgelöster Fluidfilm, Oberflächenspannungsmodell
Zusätzliche Modelle	Fluidfilm mit Formwiderstandskraft, Gravitation

- Eulerphase Luft
 - gasförmig (Dichte, Viskosität)
 - konstante Dichte
 - turbulent

Unter Fluidfilm wird die Fluidfilmphase definiert.

- Fluidfilmphase Wasserfilm
 - dreidimensionale Shell
 - flüssig (Dichte, Viskosität)
 - konstante Dichte
 - laminar
 - Formwiderstandsmodell

Die Eigenschaften der Eulerphase Wasser und der Fluidfilmphase Wasserfilm sind identisch, um die Massenbilanz bei der Interaktion zu wahren. Über Mehrphaseninteraktionsmodelle wird das Verhalten an den Grenzen zwischen den einzelnen Phasen festgelegt. Dazu werden die nachfolgenden drei Mehrphaseninteraktionsmodelle eingestellt.

- Phaseninteraktion: Eulerphase Wasser - Fluidfilmphase Wasserfilm
 - Film-VOF Phaseninteraktion
 - aufgelöster Fluidfilm
- Phaseninteraktion: Eulerphase Wasser - Eulerphase Luft
 - VOF-VOF Phaseninteraktion
 - Oberflächenspannungsmodell

- Mehrphasenmaterial
- Phaseninteraktion: Eulerphase Luft - Fluidfilmphase Wasserfilm
 - Film-VOF Phaseninteraktion
 - Oberflächenspannungsmodell
 - Mehrphasenmaterial

Mit dem Mehrphaseninteraktionsmodell zwischen der Eulerphase Wasser und der Fluidfilmphase Wasserfilm wird der Übergang von Film zu VOF und VOF zu Film ermöglicht. Die beiden anderen Mehrphaseninteraktionsmodelle aktivieren ein Oberflächenspannungsmodell zwischen den Eulerphasen Luft und Wasser respektive zwischen der Eulerphase Luft und der Fluidfilmphase Wasserfilm. Nun kann auf jeder Oberfläche ein Kontaktwinkel definiert werden, wodurch Phänomene wie der Aufbruch eines Films in Rinnsale oder das Zusammenziehen der Flüssigkeit realisiert werden können. Für die Vorgabe des Kontaktwinkels auf einer Oberfläche stehen mehrere Möglichkeiten zur Wahl: als konstanter Wert, über eine Feldfunktion, mit dem Kistler-Modell oder über verschiedene Tabellen in Abhängigkeit der Zeit und/oder Position. Die Vorgabe eines zufällig verteilten Kontaktwinkels, der die stochastischen Schwankungen der Realität berücksichtigt, wurde in Abschnitt 5.2 erfolgreich getestet und wird in den durchgeführten Simulationen präferiert. Die Wandbehandlung wird mit dem All- y^+ -Wandmodell realisiert, das die Low- Re -Modelle mit aufgelöster Wandgrenzschicht für $y^+ \leq 5$ mit dem logarithmischen Wandgesetz für $y^+ \geq 30$ durch eine Blendingfunktion vereint [145]. Während global mit dem Wandgesetz gerechnet wird, kann durch eine lokale Netzverfeinerung der dimensionslose Wandabstand y^+ reduziert und der Gültigkeitsbereich des Wandgesetzes verlassen werden. Mit dem All- y^+ -Wandmodell wird sichergestellt, dass sowohl die aufgelöste Grenzschicht und das logarithmische Wandgesetz als auch der Übergangsbereich verarbeitet werden kann.

6.2.4 Hinweise zur Vernetzung der Simulationsregion

Die Erzielung einer stabilen Lösung der komplexen Mehrphasensimulation zur Scheibenwischerbewegung erfordert viel Erfahrung des Benutzers und anfangs ein hohes Maß an Durchhaltevermögen bei der unvermeidbaren Trial-and-Error-Methode bis zur validierten Simulation. Aufgrund der Kopplung einer Vielzahl von Funktionalitäten, die auf einem zugrundeliegenden Rechengitter angewendet werden, ist die Wahl der Netzgröße ein entscheidender Faktor für die numerische Stabilität sowie die Ergebnisqualität der Mehrphasensimulation. Als Volumenzellen werden Polyeder verwendet, da bei gleichmäßiger Vernetzung die numerische Diffusion isotrop ist und damit eine geringere Netzabhängigkeit des Filmmodells im Gegensatz zu Hexaedern vorliegt (vgl. Abschnitt 5.2). Nach der ersten Grundvernetzung werden weitere Optimierungsschleifen zur Erhöhung der Netzqualität durchgeführt, weil Zellen mit geringer Qualität schnell zum Abbruch der Simulation führen können. Ferner wird dadurch das Oberflächennetz homogener und Zellgrößensprünge werden reduziert. Um die Rechenzeit zu optimieren, sind die Zellen grundsätzlich so groß wie möglich und so klein wie nötig zu gestalten, sodass die Geometrie ausreichend repräsentiert wird und die verwendeten

Modelle die Physik abbilden können. Abbildung 6.9 verdeutlicht den teilweise sehr hohen Detaillierungsgrad in der Simulation am Beispiel der Scheibenwischer. Die Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen in Kapitel 5 werden bei der Netzerstellung berücksichtigt.

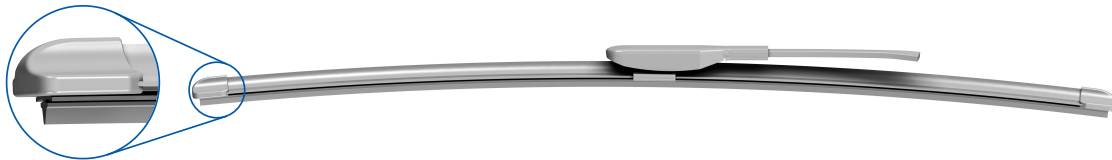
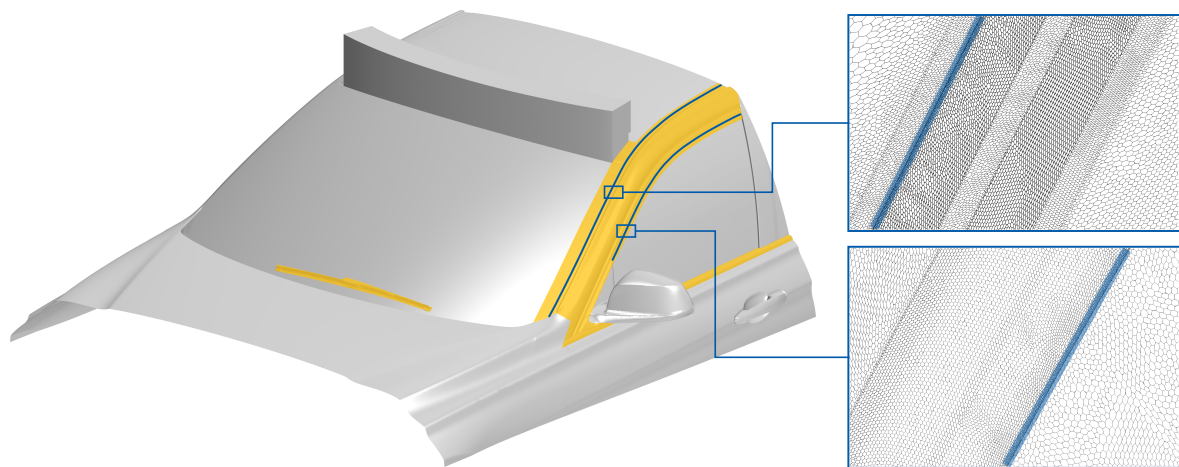


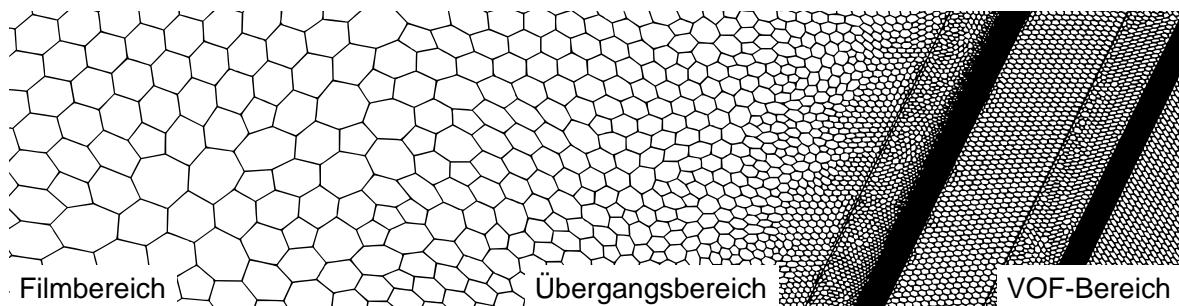
Abbildung 6.9: Detaillierungsgrad der Scheibenwischer in der Simulation

Die wandnächste Zellschicht ist besonders relevant, da diese einerseits bei der Netzverformung des Scheibenwischers deformiert wird und andererseits in Kombination mit dem definierten Grenzwert α_{trans} den Übergang zwischen dem Filmmodell und der VOF-Methode bestimmt. Gleichzeitig beeinflusst die Zellgröße die Darstellung der Wasserphase, die im Fall von VOF über eine Isooberfläche des Wasservolumenanteils bestimmt wird. Bei einer kleineren Zelle wird der gleiche Wasservolumenanteil schneller erreicht als bei einer größeren Zelle. Um einen kontinuierlichen Austausch am OSM-Interface während der Scheibenwischerbewegung zu ermöglichen, muss sichergestellt werden, dass innerhalb eines Zeitschritts keine komplette Zelle zwischen Hintergrundregion und Overset-Region übersprungen wird. Der gewählte Zeitschritt ist somit neben der CFL-Bedingung von der Netzgröße nahe der bewegten Scheibenwischer abhängig.

Auf ebenen Oberflächen wie der Frontscheibe kann mit dem Filmmodell gerechnet werden. Es versagt jedoch an geometrisch komplexeren Bauteilen, weshalb dort die Volume-of-Fluid-Methode erzwungen wird. Die Bereiche, in denen primär mit der VOF-Methode gerechnet werden muss, sind der Scheibenwischer, die Wasserfangleiste, die A-Säule mit den Rillen sowie die Zierleiste, die Fensterführung und die Dichtung um die Seitenscheibe und in gelb in Abbildung 6.10 hervorgehoben. In diesen Bereichen ist die Verwendung der VOF-Methode mit einer deutlich feineren Auflösung der freien Oberfläche unvermeidbar. Wie anhand von Voruntersuchungen in Abschnitt 5.3 festgestellt wurde, ist die Auflösung von relevanten Kanten ausschlaggebend für die korrekte Vorhersage, ob das Wasser an der Kante ablöst oder der Oberfläche folgt. Die extra verfeinerten Kanten sind in Abbildung 6.10 mit blauen Linien gekennzeichnet. Da im Vorhinein die genauen Wasserpfade auf der Fahrzeugoberfläche unbekannt sind, wird bei einer statischen Vernetzung tendenziell ein größerer Bereich als nötig fein aufgelöst. Zukünftige Erweiterungen zur adaptiven Netzverfeinerung können hier Abhilfe schaffen und Rechenzeitvorteilen gegenüber einer einmaligen Vernetzung erzielen. Bei der adaptiven Netzverfeinerung wird das Rechnetz lokal in Abhängigkeit von eingestellten Kriterien wie beispielsweise der freien Oberfläche der Wasserphase verfeinert, wodurch nur die relevanten Stellen detailliert aufgelöst werden und die restlichen Bereiche grob vernetzt bleibt.



(a) in den gelb hervorgehobenen Bereichen wird primär mit der VOF-Methode gerechnet



(b) Übergangsbereich zwischen Fluidfilm und VOF nahe der Wasserfangleiste

Abbildung 6.10: Domain der Validierungssimulation mit Darstellung des Oberflächennetzes an ausgewählten Stellen der Wasserfangleiste und der Zierleiste sowie dem Übergangsbereich auf der Frontscheibe. Die fein aufgelösten Bereichen zur Berechnung der freien Oberfläche der Wasserphase mit der Volume-of-Fluid-Methode sind gelb hervorgehoben, speziell behandelte, relevante Kanten sind mit blauen Linien markiert.

6.3 Aerodynamische Betrachtung der Scheibenwischerbewegung

Der in Abschnitt 6.2 beschriebene Aufbau einer Simulation zur Scheibenwischerbewegung wird zunächst anhand einer einphasigen Gesamtfahrzeugsimulation untersucht und mit Messungen im AEROLAB der BMW Group validiert. Die Validierung der Scheibenwischerbewegung unter einphasiger Luftanströmung ist eine notwendige Voraussetzung für den Übergang zur Mehrphasensimulation und stärkt das Vertrauen in komplexe Simulationen mit bewegten, angeströmten Komponenten. Teile diese Untersuchungen sind in ähnlicher Form in [39, 40] publiziert.

Die Messungen und Simulationen werden an der BMW 3er Limousine der sechsten Generation durchgeführt, die auch zur Charakterisierung der Strömung nahe der Seitenscheibe (vgl. Abschnitt 5.1.1) genutzt wurde. Die Bewegung der Scheibenwischer führt zu einer Beeinflussung der Fahrzeugumströmung bis zum Heck. Dies verdeutlicht die in Abbildung 6.11 dargestellte instantane Wandschubspannung auf der Fahrzeugaußenhaut zum Zeitpunkt, in dem sich die Scheibenwischer an der oberen Wendelage befinden. Die geänderte Fahrzeugumströmung durch die Scheibenwischerbewegung resultiert in einer leichten Erhöhung des

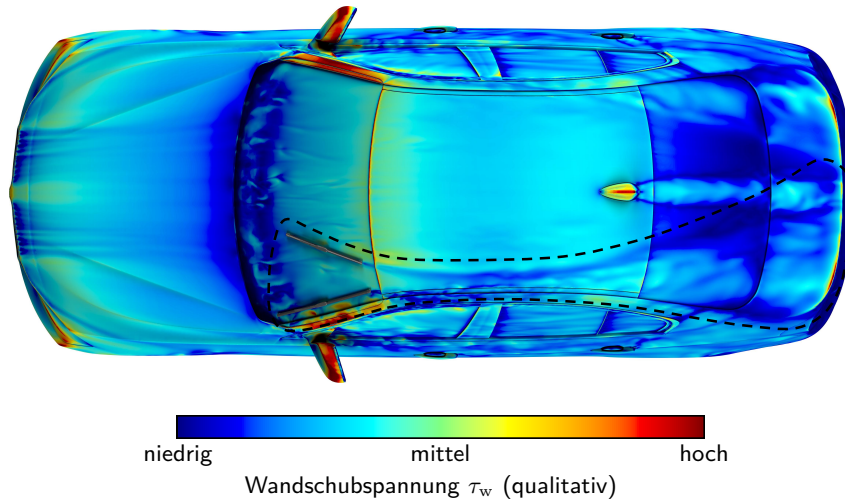


Abbildung 6.11: Instantane Wandschubspannung auf der Fahrzeugaußenhaut bei der Anströmgeschwindigkeit von 80 km h^{-1} und der oberen Wendelage der Scheibenwischer

mittleren Widerstandsbeiwerts in der Simulation. Vergleichsmessungen im AEROLAB mit und ohne bewegten Scheibenwischern bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten bestätigen sowohl den Betrag als auch die Richtung der Änderung des Widerstandskoeffizienten.

Die validierte Strömungssimulation kann zur Auslegung von Scheibenwischern und zur Analyse von instationären Phänomenen genutzt werden, was nachfolgend anhand von Beispielen verdeutlicht wird. Nach Erreichen eines eingeschwungenen Zustands wird die Strömung für einen ausreichend langen physikalischen Zeitraum (hier: zehn komplette Scheibenwischerzyklen) berechnet. Dabei werden in regelmäßigen Abständen physikalische Größen ausgelesen und gespeichert. Die geschaffene Datenbasis wird in MATLAB mit Hilfe der Frequenz- und Modalanalyse ausgewertet.

Abbildung 6.12 zeigt den gemeinsamen Verlauf des Widerstandskoeffizienten der beiden Scheibenwischer (in globale x -Richtung) für einen kompletten Scheibenwischerzyklus. Ein Zyklus dauert $1,5 \text{ s}$, wobei die Scheibenwischer dabei von der unteren Wendelage im Windlauf zur oberen Wendelage nahe der A-Säule und wieder zurück laufen. Bei Betrachtung eines einzelnen Scheibenwischers sind die Positionen der Maxima und Minima leicht auf der Zeitachse verschoben. Nahe der unteren Wendelage, wo die Scheibenwischer durch die Motorhaube geschützt sind und damit nicht direkt angeströmt werden, sind jeweils die Minima im c_x -Verlauf. Ein weiteres, lokales Minimum ist an der oberen Wendelage vorzufinden, bei der die Scheibenwischer in Hauptströmungsrichtung orientiert sind. Befinden sich die Scheibenwischer im Bereich der Frontscheibe mit den höchsten Drücken (bei etwa $0,28 \text{ s}$ und $1,21 \text{ s}$), stehen diese quer zur Hauptströmungsrichtung und der Verlauf des Widerstandskoeffizienten weist jeweils ein Maximum auf. Das Maximum der Abwärtsbewegung ist aufgrund der höheren Relativgeschwindigkeit zwischen der Luftumströmung und den Scheibenwischern größer als das Maximum der Aufwärtsbewegung.

Für den Auftriebskoeffizienten der beiden Scheibenwischer (in globale z -Richtung) ergibt sich ein sehr ähnlicher Kurvenverlauf mit vergleichbaren charakteristischen Maxima und Minima (nicht explizit dargestellt wegen der Ähnlichkeit zur Abbildung 6.12). Das Maximum

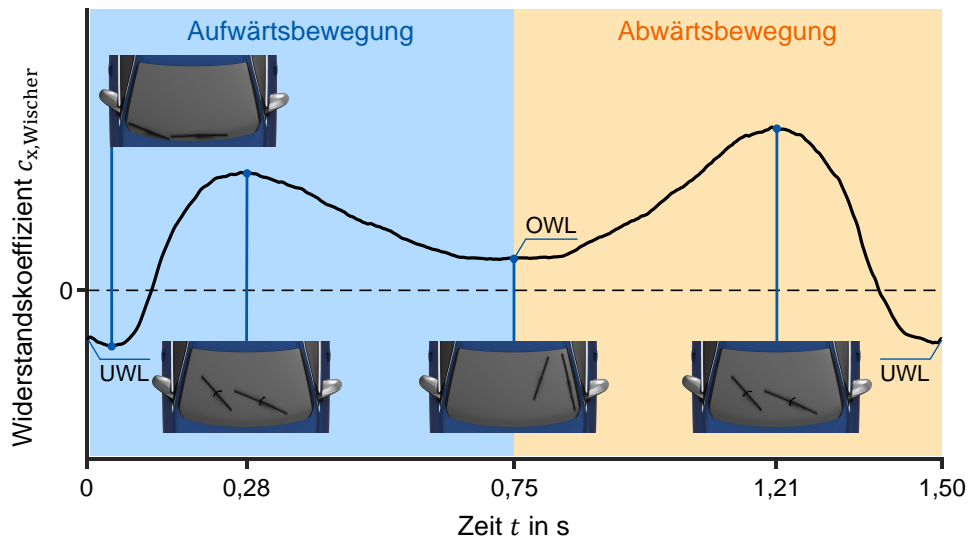


Abbildung 6.12: Verlauf des Widerstandskoeffizienten der beiden Scheibenwischer $c_{x,Wischer}$ über einem kompletten Zyklus (UWL – untere Wendelage, OWL – obere Wendelage)

der Abwärtsbewegung ist ebenfalls größer als das der Aufwärtsbewegung. Übersteigt der senkrecht zur Frontscheibe wirkende Anteil der resultierenden Kraft die Vorspannkraft des Scheibenwischer, besteht die Gefahr, dass der jeweilige Wischer kurzzeitig von der Scheibe abhebt. Dieses Phänomen ist nicht nur nachteilig hinsichtlich der Reinigung, sondern auch hinsichtlich der Lebensdauer von Scheibenwischern [171]. Um ein Abheben des Scheibenwischers zu verhindern, kann die Vorspannkraft erhöht werden. Die größere Vorspannkraft führt jedoch zu einer erhöhten Reibung zwischen Gummilippe und Glas, wodurch der Verschleiß der Gummilippe und der Geräuschpegel während des Wischens beeinflusst werden [134]. Bei der Auslegung gilt es das Optimum aus Abhebe- und Vorspannkraft zu finden, wobei die Gestalt des Wischers den aerodynamischen Charakter und damit die Abhebekraft bestimmt. Instationäre Simulationen können helfen, um die resultierenden Kräfte auf unterschiedlich gestaltete Scheibenwischer bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten abzuschätzen. Bei einer Simulation ohne Bewegung des Scheibenwischersystems, wie beispielsweise in [29, 98, 169] für verschiedene statische Scheibenwischerstellungen, können die genannten Unterschiede zwischen Aufwärts- und Abwärtsbewegung der Scheibenwischer nicht beobachtet werden. Das sich einstellende Maximum liegt dabei betragsmäßig zwischen den beiden Maxima der Simulation mit tatsächlich bewegter Scheibenwischergeometrie.

Wird die gespeicherte Datenbasis einer Modalanalyse (hier: Proper Orthogonal Decomposition [15, 144]) unterzogen, lassen sich Schwankungen im Strömungsfeld lokalisieren. Ein Beispiel zeigt die zweit energiereichste Mode der Druckschwankung auf der vorderen, linken Seitenscheibe in Abbildung 6.13. Sie erfasst einerseits die Abwanderung von Wirbelstrukturen hinter dem linken Außenspiegel und andererseits die Dynamik des A-Säulenwirbels. Der zugehörige Modalkoeffizient verknüpft die Ausprägung der Druckschwankung mit dem Zeitpunkt der Simulation und damit mit der Position des Scheibenwischers auf der Frontscheibe. Die höchsten Werte des Modalkoeffizienten liegen nahe der oberen Wendelage und die niedrigsten nahe der unteren Wendelage der Scheibenwischer vor. Bei Annäherung an

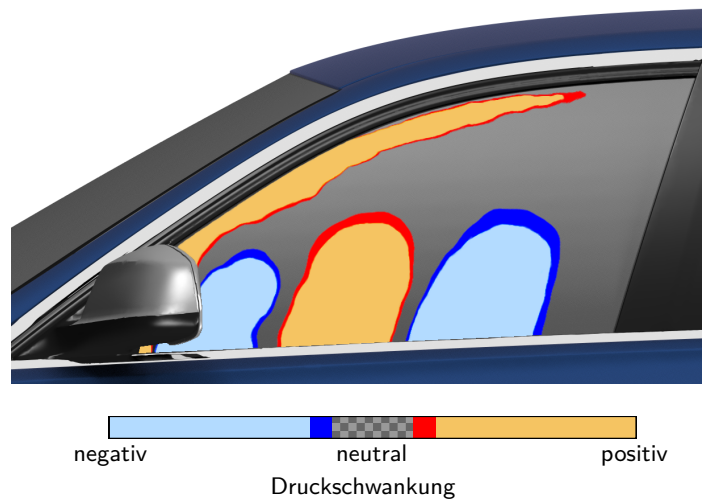


Abbildung 6.13: Druckmode auf der vorderen, linken Seitenscheibe des Fahrzeugs (in Anlehnung an [39])

die obere Wendelage steigt demnach der Druck in dem roten Bereich nahe der A-Säule in Abbildung 6.13. Ein Teil der zur A-Säule strömenden Luft wird in dieser Position durch die Scheibenwischer in Richtung des Dachs abgeleitet, wodurch dem A-Säulenwirbel weniger Energie zugeführt wird. Die Rotationsgeschwindigkeit des Wirbels wird reduziert und der Druck erhöht. Die am Außenspiegel ablösenden Wirbelstrukturen sind den höherfrequenten Schwingungen des Modalkoeffizienten bei etwa 48,6 Hz zuzuordnen und unabhängig von der Position der Scheibenwischer auf der Frontscheibe. Eine auf den Zeitverlauf des Modalkoeffizienten oder des Widerstandsbeiwerts des Fahrzeugs angewandte Frequenzanalyse verdeutlicht die hohe Relevanz der Scheibenwischerfrequenz an der jeweiligen Ursprungsfunktion. In beiden Fällen liegt bei der Scheibenwischerfrequenz von $\frac{2}{3}$ Hz der höchste Peak vor. Die instationäre Simulation ermöglicht detaillierte Analysen und Optimierungen von Scheibenwischern hinsichtlich der Umströmung und kann zur zusätzlichen Berücksichtigung von aerodynamischen und aeroakustischen Phänomenen im Auslegungsprozess herangezogen werden.

6.4 Validierung der Scheibenwischermethodik bei einer Luftanströmung mit 0 m s^{-1} und 10 m s^{-1}

Nachdem gezeigt wurde, wie eine Simulation zur Scheibenwischerbewegung grundsätzlich aufgebaut ist (siehe Abschnitt 6.2), dass die einphasige Simulation der Scheibenwischerbewegung plausible Werte liefert (siehe Abschnitt 6.3) und dass die Strömungsfelder einer Ausschnittsimulation gut mit den Feldern einer Gesamtfahrzeugsimulation übereinstimmen (siehe Abschnitt 5.4), wird in diesem Abschnitt die mehrphasige Simulationsmethodik validiert. Dazu werden Mehrphasensimulationen zu dem in Abschnitt 6.1 beschriebenen Validerungsexperiment mit dem Wasseraustrittskörper auf der Dachkante durchgeführt und sowohl qualitativ als auch quantitativ verglichen. Zur Vorgabe einer zufälligen Kontaktwinkelstreuung auf den Oberflächen wird das in Abschnitt 5.2.1 eingeführte Verfahren genutzt, welches nachfolgend mit dem Begriff Kontaktwinkelteppich bezeichnet wird.

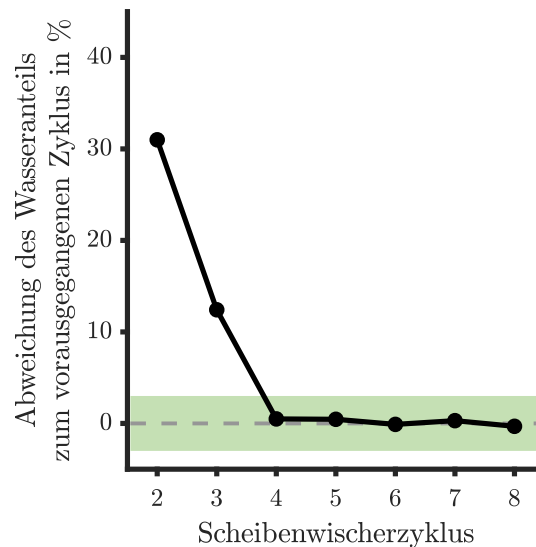


Abbildung 6.14: Ermittlung des eingeschwungenen Zustands in der Simulation

Aufgrund des hohen Rechenaufwands der Mehrphasensimulation können beim Vergleich mit dem Experiment nur wenige, repräsentative Scheibenwischerzyklen im eingeschwungenen Zustand herangezogen werden. Um zu überprüfen, ob sich in der Simulation ein eingeschwungener Zustand gebildet hat, wird der Wasseranteil durch den Motorraum über jeden Scheibenwischerzyklus berechnet und mit dem vorherigen Zyklus verglichen. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.14 für eine Rechnung mit acht Scheibenwischerzyklen dargestellt. Auf der Abszisse ist der Scheibenwischerzyklus und auf der Ordinate die jeweilige prozentuale Abweichung zum direkt vorausgegangenen Scheibenwischerzyklus aufgetragen. Bedingt durch die Initialfilmhöhe auf der Windschutzscheibe ist die Abweichung vor allem in den ersten Zyklen recht hoch. Ab dem dritten Scheibenwischerzyklus liegt ein eingeschwungener Zustand vor und die prozentuale Abweichung bleibt für die anschließenden Zyklen innerhalb des grün hinterlegten Akzeptanzbereichs von $\pm 3\%$. In diesem Fall ist die betragsmäßige Abweichung der folgenden Scheibenwischerzyklen sogar stets kleiner als 1% . In den aufgezeigten Simulationen werden in der Regel nur vier Scheibenwischerzyklen berechnet und hinsichtlich der Abweichung zum vorausgegangenen Zyklus überprüft. Sollte die prozentuale Abweichung des letzten Zyklus zum vorherigen Scheibenwischerzyklus außerhalb des Akzeptanzbereichs von $\pm 3\%$ liegen, wird ein weiterer Zyklus berechnet und die Abweichung erneut geprüft.

6.4.1 Qualitativer Vergleich von Experiment und Simulation

Frontansicht mit Standard-Wasserfangleiste

Der Vergleich des Bild- und Videomaterials von Versuch und Simulation offenbart eine sehr hohe qualitative Übereinstimmung. Abbildung 6.15 zeigt eine Gegenüberstellung einer Momentaufnahme mit dem Scheibenwischer auf der Frontscheibe. Im Experiment wird das mit der Fluoreszenzmethode sichtbar gemachte Wasser anhand der vorherigen Kalibrierungsfärbung (vgl. Abschnitt 4.2.2). Da die Aufnahmen aufgrund der verwendeten Fluoreszenzmethode im abgedunkelten Umweltwindkanal durchgeführt wurden, ist der schwarze Scheibenwischer

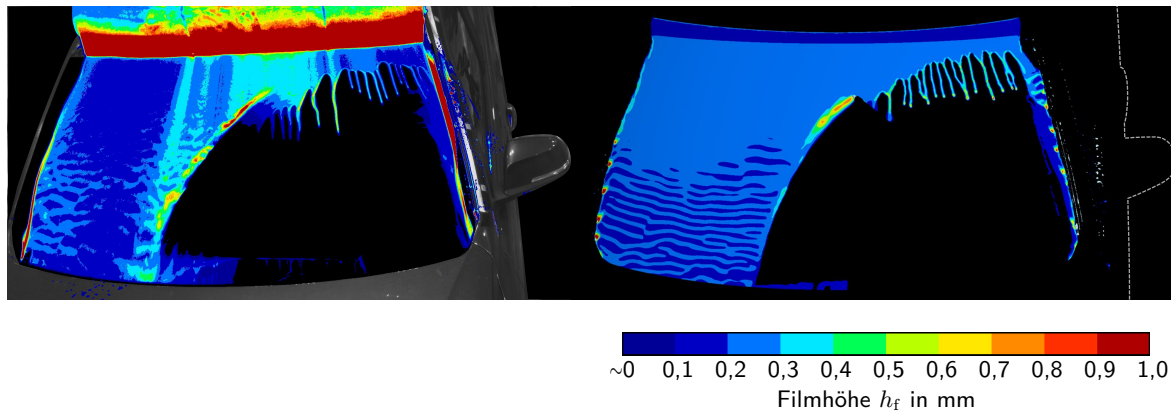


Abbildung 6.15: Vergleich der Frontansicht von Experiment (links) und Simulation (rechts) mit vorgegebenem Kontaktwinkelteppich für die Standard-Wasserfangleiste mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 0 m s^{-1}

kaum erkennbar. Das gegenübergestellte Bild der Simulation ist in der Darstellung an den Versuch angepasst. Die ebenen Flächen werden mit dem Filmmodell berechnet und sind in zehn Farbstufen von schwarz bis rot in Abhängigkeit der Filmhöhe eingefärbt. An Hindernissen (Stufen, Kanten, Rinnen, etc.) wird auf die Volume-of-Fluid-Methode übergegangen, da dort das Filmmodell an seine Grenzen stößt. Die Darstellung der mit VOF berechneten Wasserphase erfolgt über die hellbaue Isooberfläche.

In beiden Fällen bilden sich Rinnsale ähnlicher Dicke auf dem vom Scheibenwischer überfahrenen Bereich der Frontscheibe, während die übrige Frontscheibe größtenteils mit einem flächigen Film benetzt ist. Die Fließrichtung und Form der Rinnsale ist dabei identisch. Bei dieser Konfiguration mäandrieren die Rinnsale nicht. Die Abstände zwischen den Rinnsalen quer zur Fließrichtung sind in der Simulation und dem Experiment vergleichbar. In der Simulation zeigt sich jedoch ein etwas regelmäßigeres Benetzungsmuster als im Experiment, da sich bei letztgenanntem neben der gleichmäßigen Rinnsalbenetzung vereinzelt Bereiche mit wenigen, größeren Rinnsalen ausbilden. Das Wasserrückzugverhalten durch die Scheibenwischer an der oberen Wendelage nahe der A-Säule wird von der Simulation und dem Experiment gleichermaßen wiedergegeben. In der gezeigten Konfiguration ist lediglich in der oberen Hälfte der A-Säule ein minimales Rückzugverhalten zu erkennen, während in der unteren Hälfte kein Wasser zurückgezogen wird.

Im Bereich des flächigen Films entstehen sowohl im Experiment als auch in der Simulation Oberflächenwellen. Diese treten vorwiegend in der unteren Hälfte der beifahrerseitigen Windschutzscheibe auf. Die Wellenbildung basiert auf einer hydrodynamischen Instabilität des Films. Im Allgemeinen stellt sich direkt nach dem Wassereinlauf zunächst ein glatter, stabiler Film ein, der mit zunehmender Lauflänge anfälliger für eine Wellenbildung wird. Nach [27] kann die Einlauflänge je nach Flüssigkeitsbelastung bis zu mehrere Zentimeter einnehmen. Die Oberflächenspannung besitzt einen stabilisierenden Einfluss auf den Film (vgl. Abschnitt 3.4), der sich mithilfe der dimensionslosen Filmkennzahl in einen Wert überführen lässt (vgl. [26]). Je höher die Filmkennzahl ist, desto stabiler ist die Filmoberfläche. Am rechten und linken Rand des Films bildet sich je ein Wulst. Dieser resultiert aus der Interaktion der drei Phasen an der Kontaktlinie, an der die Einhaltung eines bestimmten Kontaktwinkels angestrebt wird.

In der Momentaufnahme des Experiments deutet die rote Einfärbung des Ausgleichschaums unterhalb des Wasseraustrittskörpers auf eine hohe Filmdicke hin. Diese ist jedoch nicht repräsentativ, da die Fluoreszenzintensität durch das vollständig durchtränkte Tuch, das über den Wasseraustrittskörper gelegt wird, überbewertet wird. Ein ähnliches Phänomen tritt an der fahrerseitigen A-Säule auf. Das Versuchsfahrzeug besitzt eine modulare A-Säulengeometrie, wodurch Wasserfangleiste und A-Säule relativ einfach getauscht werden können. Der Spalt zwischen Frontscheibe und Wasserfangleiste sowie zwischen Wasserfangleiste und A-Säule wurde im Experiment mit Aluminium-Klebeband verschlossen, um einen möglichen Verlust von Wasser durch den Spalt auszuschließen. Das diffus emittierte Licht der Fluoreszenz wird durch das Aluminium-Klebeband reflektiert und von der Kamera wird eine künstlich erhöhte Helligkeit detektiert. Bei der Einfärbung in Abhängigkeit der Filmhöhe wirken die Stellen oberhalb des Aluminium-Klebebands daher stärker benetzt als sie tatsächlich sind.

Am Scheibenwischeraußenkreis ist in beiden Fällen eine erhöhte Filmdicke zu beobachten, die aus der Scheibenwischerbewegung resultiert. Während der Bewegung wird das vom Scheibenwischer mitgenommenen Wasser gesammelt und durch die Zentrifugalkraft entlang des Wischerblattes nach außen geleitet. Dort verbindet sich das Fluid mit dem angrenzenden, flächigen Film, woraus die lokale Aufdickung entlang des äußeren Scheibenwischerkreises hervorgeht. Des Weiteren benetzt das mit dem Scheibenwischer zum Windlauf geschobene Wasser im Experiment und in der Simulation etwa die gleiche Breite am unteren Ende der Frontscheibe. Insgesamt zeigt sich ein sehr ähnliches Benetzungsverhalten auf der Frontscheibe.

Seitenansicht mit Standard-Wasserfangleiste

Abbildung 6.16 zeigt den Vergleich der seitlichen Fahrzeugansicht für die Standard-Wasserfangleiste. Hierbei sei angemerkt, dass die nebeneinander platzierten Bilder unter leicht unterschiedlichem Perspektiven aufgenommen wurden. Die experimentelle Seitenaufnahme wird stets von schräg hinten erstellt, um eine Verdeckung des vorderen Seitenscheibenbereichs durch den linken Außenspiegel zu vermeiden. In der Simulation wird der linke Außenspiegel bei dieser Darstellungsform ausgeblendet, wodurch eine seitliche Aufnahme ohne Seitenscheibenverdeckung durch den Außenspiegel erzeugt werden kann. Da die seitlichen Aufnahmen im Versuch durch ein Kamerasystem auf einem neben dem Fahrzeug platzierten Wagen erzeugt werden, kann die Perspektive zudem je nach Aufbau am Versuchstag leicht variieren.

In der seitlichen Gegenüberstellung in Abbildung 6.16 werden die beiden in der Simulation verwendeten Mehrphasenmodelle deutlich sichtbar. Speziell in den feinen Rinnen der Fensterführung und der Zierleiste wird ausschließlich mit VOF gerechnet. Dort akkumuliert Wasser und es bilden sich einzelne Tropfen. Ab Überschreitung einer gewissen Masse fließen die Tropfen durch Gravitation getrieben die Rinne herunter. Dieses Verhalten wird gleichartig im Videomaterial zum Experiment festgestellt. Die periodisch mit der Frequenz des Scheibenwischers zur A-Säule transportierte Wassermenge kann jedoch nicht vollständig abgeführt werden. Es kommt zu einem Wasserübertritt an der A-Säule. Die Seitenscheibe wird dabei sowohl im Experiment als auch in der Simulation im vorderen Drittel geringfügig benetzt. Die sich bildenden Rinnsale haben dabei eine geringe Höhe und fließen nahezu gerade auf der Scheibe herunter. Im Experiment wird die Seitenscheibe und die A-Säule im Vergleich

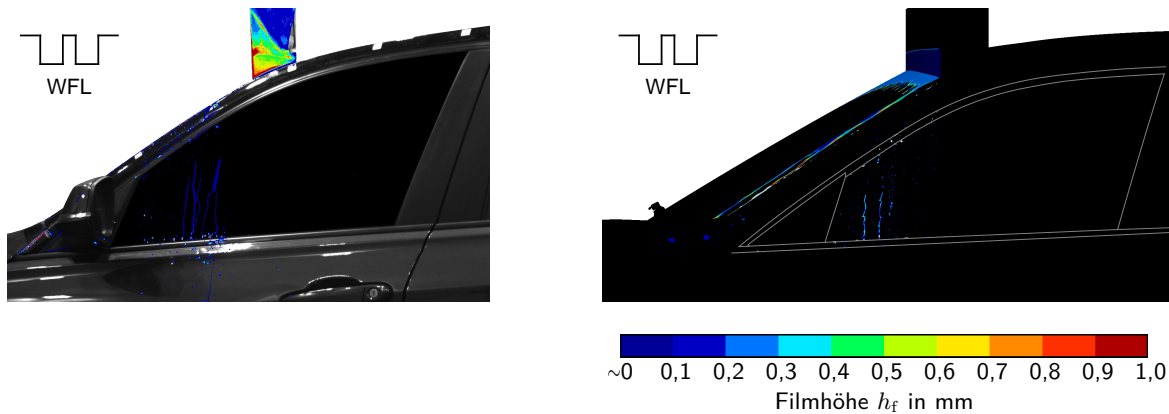


Abbildung 6.16: Vergleich der Seitenansicht von Experiment (links) und Simulation (rechts) für die Standard-Wasserfangleiste mit einer Luftströmungsgeschwindigkeit von 0 m s^{-1}

zur Simulation scheinbar langsamer entnetzt. Dadurch wird das Benetzungsmuster aufgrund des über die A-Säule transportierten Wassers des nachfolgenden Scheibenwischerzyklus von der Vorbenetzung stärker beeinflusst und die Rinnsale verlaufen entlang der gleichen Pfade. In der Simulation besitzt die Benetzungshistorie hingegen nur eine untergeordnete Rolle. Der Eindruck eines langsameren Entnetzungsvorgangs im Experiment kann jedoch durch die Wahl der untersten Intensitätsgrenze zur Differenzierung zwischen benetzter und unbenetzter Flächen verfälscht werden, da in diesem Fall selbst extrem dünne Filme zu einer als benetzt gekennzeichneten Stelle im Ergebnisbild führen. Der Vergleich der Seitenscheibenbenetzung auf der Fahrzeugseite weist ebenfalls eine sehr hohe Übereinstimmung auf. In beiden Fällen werden identische Phänomene beobachtet und auch die Auftrittsorte decken sich.

Seitenansicht bei geschlossener Wasserfangleiste

Die Versuche und Simulationen werden für zwei verschiedene A-Säulenvarianten durchgeführt. Die erste, bereits verglichene Variante wird als Standard-Wasserfangleiste bezeichnet, obwohl diese nicht der klassischen Serien-Wasserfangleiste des BMW F30 entspricht. Sie besteht stattdessen aus zwei benachbarten, 10 mm tiefen und 8 mm breiten Rinnen zum Abtransport des zur A-Säule transportierten Wassers. Die Breite einer Rinne liegt damit über der doppelten Kapillarlänge von Wasser (vgl. Gl. (3.9)). Für die zweite Variante werden die beiden Rinnen geschlossen, sodass eine A-Säulengeometrie ohne explizites Wasserfangkonzept entsteht.

Abgesehen vom geänderten Wasserfangkonzept an der A-Säule unterscheiden sich die Konfigurationen im zugeführten Wassermassenstrom. Bei der geschlossenen Wasserfangleiste ist dieser etwas niedriger. Der qualitative Vergleich der Frontansicht von Experiment und Simulation für die geschlossene Wasserfangleiste ist identisch gut wie bei der Standard-Wasserfangleiste. Auf der Frontscheibe werden die gleichen Phänomene beobachtet. Bei der Seitenansicht – zu sehen in Abbildung 6.17 – zeigen sich deutliche Unterschiede zur anderen A-Säulenvariante. Aufgrund des fehlenden Wasserfangkonzepts fließt mehr Wasser über die A-Säule und auf die Seitenscheibe. Die Seitenscheibe wird dabei mit einem breiten Film benetzt.

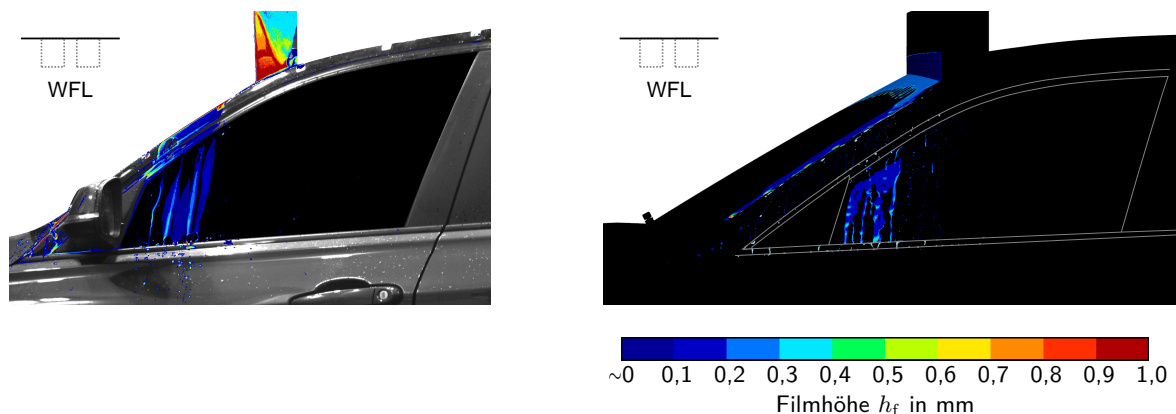


Abbildung 6.17: Vergleich der Seitenansicht von Experiment (links) und Simulation (rechts) für die geschlossene Wasserfangleiste mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 0 m s^{-1}

Die Gegenüberstellung zwischen Experiment und Simulation mit geschlossener Wasserfangleiste (Abbildung 6.17) offenbart erneut eine gute Übereinstimmung. Auf der A-Säule sammelt sich in beiden Fällen Wasser in den feinen Rinnen, das gravitationsgetrieben herabfließt. Die rot eingefärbten Stellen auf der A-Säule lassen sich – analog zur Frontansicht des Experiments – auf das Aluminium-Klebeband, das in diesem Fall zur Schließung der Senkbohrungen für die Befestigungsschrauben der A-Säule am Versuchsfahrzeug verwendet wird, und die damit verbundene Reflexion des diffus strahlenden Fluoreszenzlichts zurückführen. In regelmäßigen Zeitabständen schiebt der Scheibenwischer die auf der Frontscheibe aufgesammelte Flüssigkeit zur A-Säule, die nahezu ungehindert überströmt wird. An der Stufe der Fensterführung löst das Wasser kurzzeitig von der Wand ab, ehe es wenige Millimeter tiefer auf die Seitenscheibe auftritt. Die Benetzung der Seitenscheibe findet hauptsächlich in Form von dünnen Filmen und Rinnsalen im vorderen Drittel der Scheibe statt. Die Rinnsale besitzen eine gerade Form. Die Entnetzung der Flächen ist im Experiment erneut langsamer als in der Simulation. Einige Oberflächen wie beispielsweise der überflossene A-Säulenabschnitt oder der vordere Bereich der Seitenscheibe bleiben mit einer geringen Filmhöhe benetzt, die das mit dem nächsten Scheibenwischerzyklus ankommende Wasser beeinflusst. In der Simulation ist der Effekt durch die Benetzungshistorie der Oberfläche geringer. Insbesondere in Bereichen, in denen mit der VOF-Methode gerechnet wird, werden die Oberflächen recht schnell entnetzt, was mitunter durch die Darstellungsweise mit Isooberflächen optisch begünstigt wird. Die wesentlichen Phänomene werden wiederum korrekt abgebildet und das Benetzungsmuster auf der Seitenscheibe ist vergleichbar zum Versuch.

6.4.2 Quantitativer Vergleich von Experiment und Simulation

Neben dem qualitativen Vergleich der Benetzungsmuster auf der Front- und Seitenscheibe werden quantitative Größen gegenübergestellt. Erst dadurch wird eine qualitativ hochwertige Validierung ermöglicht. Als quantitative Vergleichsgrößen werden im nachfolgenden Abschnitt der prozentuale Wasseranteil, der über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste durch den Motorraum fließt, und die Rinnsalfließgeschwindigkeit untersucht.

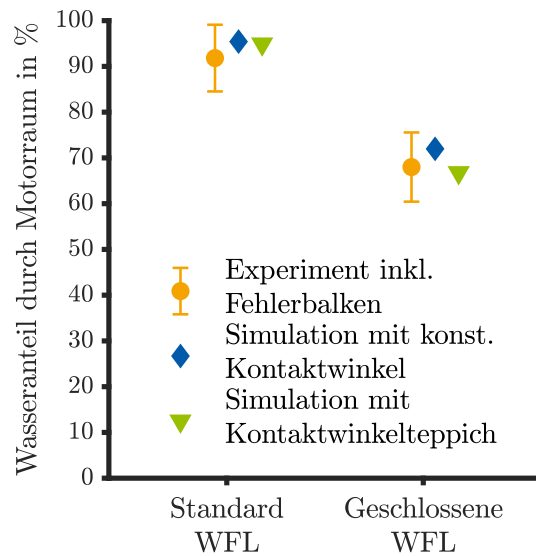
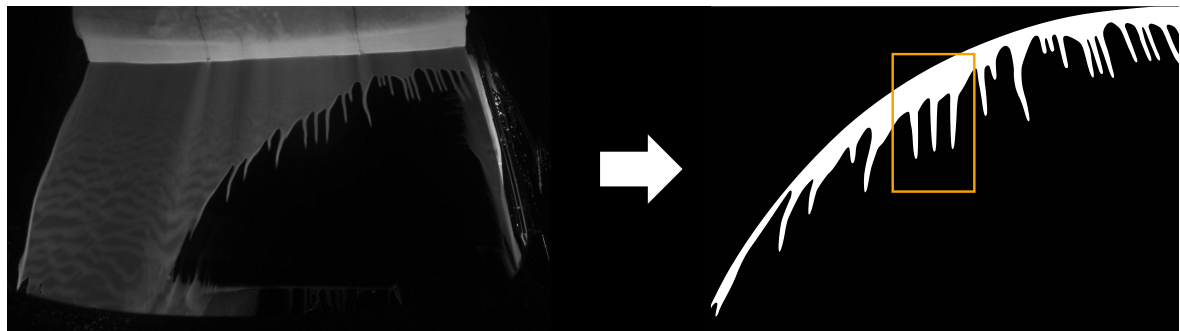


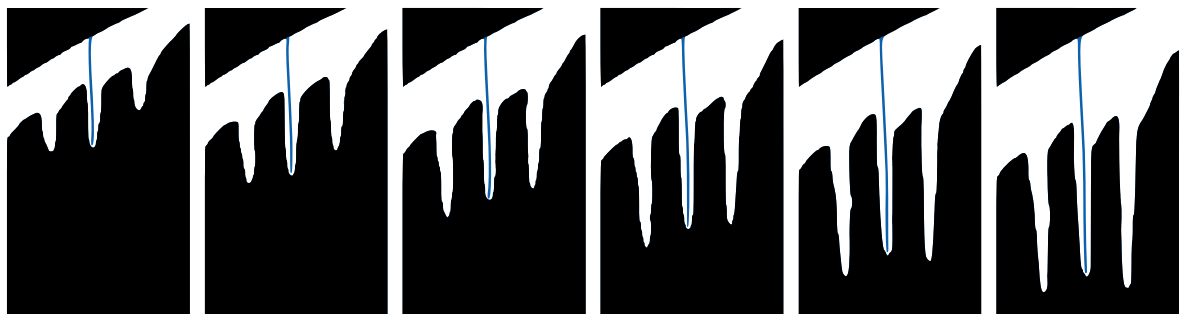
Abbildung 6.18: Prozentualer Anteil des über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste abfließenden Wassers für verschiedene A-Säulenvarianten ohne Luftanströmung

Das über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste herabfließende Wasser wird mit der in Abschnitt 6.1.3 gezeigten Wasserauffangkonstruktion gesammelt, über Schlauchleitungen durch das linke und das rechte Radhaus abtransportiert und gemessen. Die Wassermenge des Zulaufs und die durch den Motorraum abgeführte Wassermenge werden dabei über eine definierte Zeitspanne gemessen und anschließend in einen Massenstrom umgerechnet. Die Zeitspanne wird so gewählt, dass diese zum einen möglichst lang ist und zum anderen eine ganzzahlige Anzahl an Scheibenwischerzyklen betrachtet wird. Durch Differenzbildung von zulaufender und abgeführter Wassermenge kann die nicht direkt messbare Wassermenge, die größtenteils über die A-Säule fließt, errechnet werden. Der Versuch zu einer speziellen Konfiguration wird mehrfach unter gleichen Bedingungen wiederholt, um die Fehlervarianz abzuschätzen. Aus den Einzelmessungen werden anschließend das arithmetische Mittel sowie die Standardabweichung der Stichprobe gebildet. In der Simulation kann der Massenstrom zeitgleich für alle relevanten Stellen ausgegeben werden. Die Berechnung des Wasseranteils erfolgt analog zum Experiment, wobei aus Rechenzeitgründen nur ein eingeschwungener Scheibenwischerzyklus herangezogen wird.

Abbildung 6.18 zeigt den während des Scheibenwischvorgangs über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste abfließenden Wasseranteil für die beiden untersuchten A-Säulenvarianten. Demnach fließen bei der Standard-Wasserfangleiste etwa 92 % des zugeführten Wassers durch den Motorraum ab. Bei der geschlossenen Variante verringert sich der Anteil auf ungefähr 68 %, d. h. es wird eine größere Wassermenge über die A-Säule befördert. Trotz der langen Messzeit liegt die Streuung der mehrfach durchgeführten Versuche für beide A-Säulenvarianten bei rund 7 % (vgl. orange Punkte mit Fehlerbalken in Abbildung 6.18). Das liegt mitunter an den extrem kleinen Wassermengen, wodurch wenige Gramm Wasser pro Sekunde bereits einen großen Einfluss auf den prozentualen Wasseranteil durch den Motorraum haben. So führt beispielsweise eine Veränderung des gemessenen Massenstroms von $\Delta\dot{m} = 1 \text{ g s}^{-1}$ zu einer



(a) Transformation der Graustufenbilder in einen binären Bilderstapel des relevanten Bereichs (Bildvorbereitung)



(b) Automatisiertes Rinnsalverfolgen über zeitlich aufeinanderfolgende Frames des binären Bilderstapels

Abbildung 6.19: Vorgehen zur Bestimmung der Rinnsalfließgeschwindigkeit mit einer aktiven Kontur (blaue Linie) am Beispiel des markierten Ausschnitts

vierprozentigen Änderung im Wasseranteil. Der geringe Wassermassenstrom wird bewusst eingestellt, um auf der Windschutzscheibe lediglich eine dünne Filmbenetzung hervorzurufen und damit die Verwendbarkeit des Filmmodells in der Simulation sicherzustellen.

In der Simulation mit konstantem Kontaktwinkel auf der Windschutzscheibe sind die Wasseranteile (blaue, rautenförmige Marker in Abbildung 6.18) jeweils rund 4 % größer als der zugehörige Mittelwert der Experimente. Wird die Simulation mit vorgegebenem Kontaktwinkelteppich auf der Windschutzscheibe berechnet (analoges Vorgehen zur Erzeugung der zufälligen Kontaktwinkelstreuung wie in Abschnitt 5.2.1), ist der Wasseranteil (grüne, dreieckige Marker in Abbildung 6.18) im Fall der Standard-Wasserfangleiste rund 3 % größer und im Fall der geschlossenen Wasserfangleiste etwa 1 % kleiner als der zugehörige, experimentelle Mittelwert. Damit liegen beide Simulationsergebnisse innerhalb der Streubreite der Experimente. Die Übereinstimmung der Wasseranteile ist sehr gut und der Betrag der Änderung von der Standard-Wasserfangleiste zur geschlossenen Wasserfangleiste (Deltabetrachtung) wird bei konstantem Kontaktwinkel sogar korrekt wiedergegeben. Sollte trotz der zweistufigen Auffangkonstruktion (vgl. Abbildung 6.2) eine geringe Wassermenge pro Zeit nicht aufgefangen werden, so rücken die experimentellen Ergebnisse näher an die Simulationen. Aufgrund der Tatsache, dass die Seitenscheibe selbst bei der Standard-Wasserfangleiste leicht benetzt wird, kann der Wasserverlust beim Durchfließen des Motorraums – wenn überhaupt – nur marginal sein.

Die zweite quantitative Auswertegröße, die Rinnsalfließgeschwindigkeit, wird grafisch anhand der aufgezeichneten bzw. regelmäßig abgespeicherten Bilderserie bestimmt. Das Vorgehen ist in Abbildung 6.19 skizziert. Zunächst werden die Einzelbilder zu einem binären Bilderstapel zusammengefasst, wobei nur noch zwischen benetzt (weiß) und unbenetzt (schwarz) unterschieden wird. Der Bilderstapel wird anschließend auf den vom Scheibenwischer überfahrenen Bereich reduziert (Abbildung 6.19a). Der Vordergrund besitzt die maximale Intensität und der Hintergrund die minimale Intensität. Die Bildvorbereitung vereinfacht den automatisierten Trackingvorgang der Rinnsale über die einzelnen Bildframes. Jedes Rinnsal wird dazu einzeln markiert, indem eine offene, aktive Kontur (open active contour oder snake) auf dieses gesetzt wird (blaue Linie in Abbildung 6.19b). Aktive Konturen wurden erstmals in [87] vorgestellt und sind verformbare, parametrische Kurven, die sich aktiv zu einem energetischen Minimum bewegen. Die Verformung der aktiven Kontur wird durch vorgegebene Werte für die Schrittweite des Wachstums, die Dehnungssteifigkeit, die Biegesteifigkeit, die Dehnungskraft und die Anzahl der Verformungsiterationen bestimmt. Das angewandte Verfahren basiert auf [103, 104, 146]. Das markierte Rinnsal wird über aufeinander folgende Einzelbilder des Bilderstapels verfolgt und jeweils nach den Vorgaben deformiert. Durch die Reduktion der Bilder auf den vom Scheibenwischer überfahrenen Bereich wächst die aktive Kontur nur in Fließrichtung der Rinnsale an. Dies ist in Abbildung 6.19b dargestellt. Die automatisierte Verfolgung des Rinnsals über die Bilderserie funktioniert bis zu dem Zeitpunkt, in dem der Scheibenwischer das Rinnsal erfasst und der Prozess stoppt. Der Prozess muss für alle weiteren Rinnsale desselben Wischerzyklus und der nachfolgenden Zyklen wiederholt werden. Aufgrund der Notwendigkeit, jedes einzelne Rinnsal mit einer aktiven Kontur zu markieren, ist die Auswertung sehr aufwendig, allerdings werden dadurch Fehldetektionen ausgeschlossen und die Qualität der Daten steigt. Nachdem der Prozess für eine ausreichend hohe Anzahl an Rinnsalen durchgeführt wurde, werden die Gesamtlänge sowie die Veränderung an Kopf und Fuß von jeder aktiven Kontur berechnet und in einer Textdatei abgespeichert. Mit der Kenntnis des zeitlichen Abstands zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern lässt sich die Fließgeschwindigkeit der Rinnsale errechnen.

Im Experiment werden die Benetzungsmuster über mehrere Minuten aufgenommen, d. h. die mittlere Rinnsalfließgeschwindigkeit kann über mehrere Scheibenwischerzyklen anhand einer Vielzahl an Rinnsalen bestimmt werden. Aufgrund der extrem aufwendigen Simulation können nur wenige Scheibenwischerzyklen berechnet werden, wobei die anfänglichen Zyklen zum Erreichen eines eingeschwungenen Zustands benötigt werden. Für die Auswertung werden daher lediglich die letzten 1 bis 2 Scheibenwischerzyklen im eingeschwungenen Zustand verwertet. Abbildung 6.20 zeigt die Fließgeschwindigkeit für über 200 verfolgte Rinnsale des Experiments mit der Standard-Wasserfangleiste in der Farbe orange. Jeder Marker entspricht der Geschwindigkeit eines einzelnen Rinnsals, die durchgezogene Linie repräsentiert das arithmetische Mittel der Fließgeschwindigkeit über alle Rinnsale und die eingefärbte Fläche die dazugehörige Standardabweichung. Die gleiche Darstellung wird für die Ergebnisse der Simulationen verwendet. Neben den Ergebnissen aus dem Experiment sind zwei Simulationen aufgeführt. Die Simulation mit einem konstanten Kontaktwinkel auf der Windschutzscheibe ist mit blauen, rautenförmigen Markern und die Simulation mit einer vorgegebenen Kontaktwinkelstreuung mit grünen Dreiecksmarkern dargestellt. Bei beiden Simulationen werden jeweils mehr als 20 Rinnsale analysiert. Der Gesamtmittelwert für die Fließgeschwindigkeit des Experiments ist

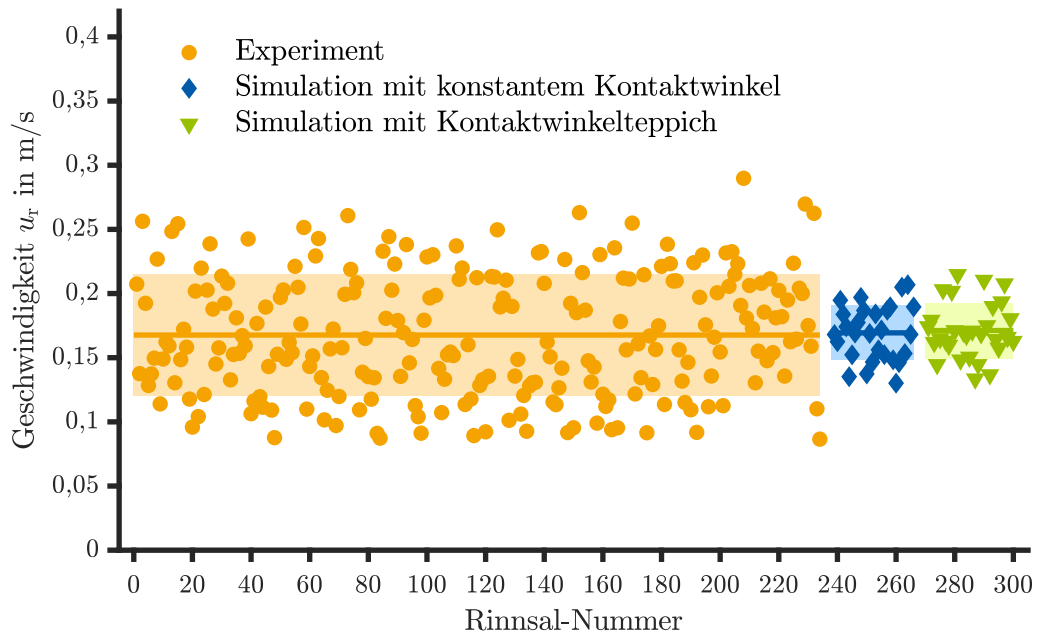


Abbildung 6.20: Fließgeschwindigkeit der Rinnsale während der Scheibenwischerbewegung für Experimente und Simulationen zur Standard-Wasserringleiste bei einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 0 m s^{-1}

identisch zu den Gesamtmittelwerten der Simulationen. Die Streuung der Einzelgeschwindigkeiten ist in beiden Simulationen geringer, was ebenfalls bei den Voruntersuchungen identifiziert wurde (vgl. Abschnitt 5.2).

Die größere Streuung der Experimente liegt mitunter an den größeren Schwankungen des Wassermassenzulaufs über der Fahrzeugbreite im Vergleich zur Simulation. Die vorgegebene, zufällige Schwankung am Wassereinlass der Simulation ist nicht ausreichend, um alle Effekte für die Streuung im Experiment zu erfassen. Wie in Abbildung 6.15 ersichtlich, ist mittig auf der Windschutzscheibe ein leicht höherer Film als auf den seitlichen Bereichen. Dadurch ist die Rinnsalfließgeschwindigkeit mittig auf der Frontscheibe lokal erhöht. Außerdem befindet sich dort ein Abschnitt, in dem der Film lediglich in wenige, eher große Rinnsale aufbricht, während beim daneben liegenden Abschnitt mit vergleichbarer Breite ein Filmaufbruch in eine größere Rinnsalanzahl zu beobachten ist. Da beim Prozess zur Ermittlung der Rinnsalfließgeschwindigkeit alle Rinnsale eines Scheibenwischerzyklus verfolgt werden, gleicht sich dies bei der Bestimmung des Gesamtmittelwerts wieder aus.

Der Einfluss eines geänderten Kontaktwinkels auf die mittlere Rinnsalfließgeschwindigkeit wird simulativ untersucht. Wird der Kontaktwinkel auf der Windschutzscheibe erhöht (hier auf 60° und 70°), steigt die mittlere Fließgeschwindigkeit der Rinnsale zusammen mit der Standardabweichung der Geschwindigkeiten an. Weiterhin wird eine tendenziell geringere Anzahl an dafür höheren Rinnsalen beobachtet. Durch Vorgabe eines größeren Kontaktwinkels ziehen sich die Rinnsale stärker zusammen, wodurch die Ausdehnung in Breitenrichtung verringert und die Ausdehnung in Höhenrichtung vergrößert wird. Dadurch reduziert sich die effektive Kontaktfläche zwischen Rinnsal und Glasscheibe. Der unveränderte Wassermassenstrom des Zulaufs aus dem Wasseraustrittskörper muss über weniger Rinnsale als zuvor abfließen, was zu

Tabelle 6.2: Mittlere Rinnsalfließgeschwindigkeit und deren Standardabweichung für Experimente und Simulationen ohne Luftanströmung mit der Standard-Wasserfangleiste und der geschlossenen Wasserfangleiste

	Experiment/ Simulation	Wasserzulauf \dot{m}_{zu} in kg min^{-1}	Kontakt- winkel θ in $^\circ$	Rinnsalfließgeschwindigkeit	
				$\overline{u_r}$ in m s^{-1}	$\delta(u_r)$ in m s^{-1}
Standard-WFL	Experiment	1,6	37 ± 4	0,17	0,05
	Simulation	1,6	40	0,17	0,02
	Simulation	1,6	40*	0,17	0,02
	Simulation	1,6	60	0,22	0,03
	Simulation	1,6	70	0,25	0,06

geschlossene WFL	Experiment	1,3	37 ± 4	0,14	0,05
	Simulation	1,3	40	0,15	0,02
	Simulation	1,3	40*	0,15	0,02
	Simulation	1,3	70	0,21	0,05

* mit Vorgabe eines Kontaktwinkelteppichs					

einer Geschwindigkeitserhöhung führt. Im Experiment liegt der gemessene Kontaktwinkel auf der vorbehandelten Frontscheibe bei etwa $(37 \pm 4)^\circ$. In der Referenzsimulation wird zum einen ein konstanter Kontaktwinkel von 40° und zum anderen eine stochastische Kontaktwinkelverteilung um den Mittelwert bei 40° vorgegeben. Weiterhin wird je eine Simulation bei einem Kontaktwinkel von 60° und 70° berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Die Experimente zur geschlossenen Wasserfangleiste werden bei einem niedrigeren, zugeführten Wassermassenstrom durchgeführt. Die mittlere Fließgeschwindigkeit der Rinnsale liegt auf einem niedrigeren Niveau verglichen mit der Standard-Wasserfangleiste (vgl. Tabelle 6.2). Die geringe Abnahme der Rinnsalfließgeschwindigkeit des Experiments wird ebenfalls in den Simulationen mit konstantem Kontaktwinkel und mit vorgegebenem Kontaktwinkelteppich beobachtet. Die absolute Veränderung von der Standard-Wasserfangleiste zur geschlossenen Wasserfangleiste fällt in den Simulationen minimal kleiner aus. Dennoch liegt die gemittelte Geschwindigkeit inklusive der einfachen Standardabweichung vollständig im Streuband der Experimente. Die Simulationen stimmen erneut hervorragend mit den durchgeführten Experimenten überein. Durch Erhöhung des Kontaktwinkels auf der Frontscheibe (hier von 40° auf 70°) steigt – wie im Fall mit Standard-Wasserfangleiste – die mittlere Fließgeschwindigkeit

der Rinnsale und die Standardabweichung an. Der Vergleich der Simulationen zum konstanten Kontaktwinkel von 70° untereinander bestätigt die Abnahme der Fließgeschwindigkeit mit sinkendem Wasserzulauf. Bei einem zugeführten Wassermassenstrom von $1,6 \text{ kg min}^{-1}$ (entspricht einer Flüssigkeitsbelastung von $24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) beträgt die dimensionslose Filmreynoldszahl etwa 24 und bei $1,3 \text{ kg min}^{-1}$ (bzw. $20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) etwa 20. Beide Filmreynoldszahlen liegen im Bereich mit pseudolaminaren Filmen und damit unterhalb des Grenzwertes für einen turbulenten Film (vgl. Abschnitt 3.3).

6.4.3 Untersuchungen bei Luftanströmung

Zusätzlich werden mit dem Wasseraustrittskörper Versuche unter Luftanströmung durchgeführt. Um einerseits ein Wegfliegen von leicht fixierten Teilen, wie beispielsweise dem über den Wasseraustrittskörper gelegten Tuch, zu vermeiden und andererseits ein Herabfließen des austretenden Wassers auf der Windschutzscheibe zu ermöglichen, wird nur eine geringe Luftgeschwindigkeit von 10 m s^{-1} gewählt. Diese Geschwindigkeit ist ausreichend, um den Einfluss auf die Benetzung festzustellen. Die auf die Frontscheibe treffende Luftströmung wird entlang der Scheibenkrümmung von der Fahrzeugmitte zu den Seiten umgelenkt und wirkt dabei auf den Wasserfilm. Das Wasser wird selbst ohne Vorliegen einer Scheibenwischerbewegung stellenweise über die wasserfanglose A-Säule befördert. Die Reynoldszahl beträgt bei dieser Konfiguration $3,1 \cdot 10^6$. Die Abschätzung der benötigten Lauflänge bis zur Transition in der Grenzschicht mit der kritischen Reynoldszahl $Re_{\text{krit}} = 5 \cdot 10^5$ einer längsangeströmten Platte [139] ergibt, dass der Umschlag von laminar zu turbulent bei der vorliegenden Geschwindigkeit bereits auf der Frontklappe vollzogen ist.

Abbildung 6.21 zeigt die Gegenüberstellung einer Momentaufnahme unter Luftanströmung mit einer Geschwindigkeit von 10 m s^{-1} . Die qualitative Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation ist sehr gut. Das auf die Frontscheibe abgegebene Wasser fließt entgegen der Luftströmungsrichtung die Scheibe herunter. Auf der Beifahrerseite liegt eine flächige Filmbenetzung vor, während sich im vom Scheibenwischer überfahrenen Bereich Rinnsale bilden. Die Rinnsale mäandrieren nicht und fließen mit einer zusätzlichen Richtungskomponente von der Scheibenmitte nach außen die Windschutzscheibe herab. Je näher die Rinnsale an der

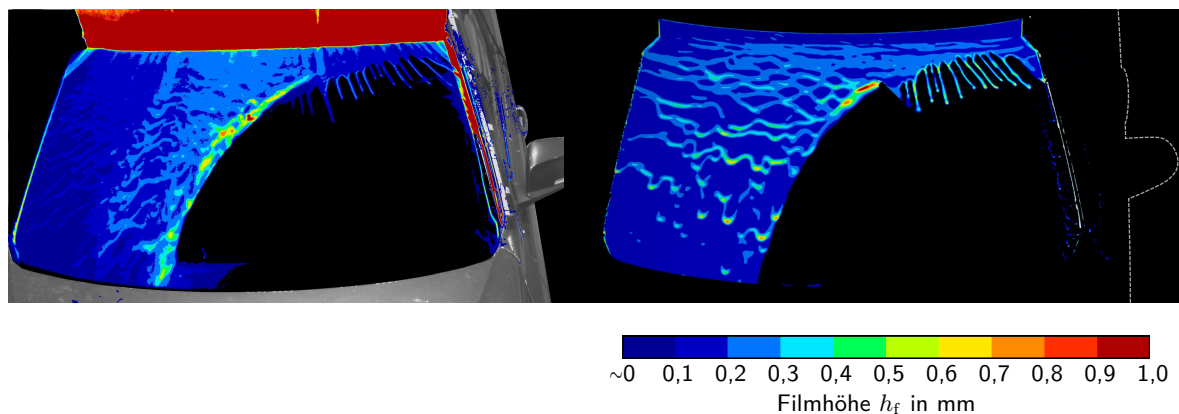


Abbildung 6.21: Vergleich der Frontansicht von Experiment (links) und Simulation (rechts) mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 10 m s^{-1}

A-Säule sind, desto stärker ist deren Ablenkung durch die Luftströmung. Ein Grund dafür ist die Beschleunigung der Luftströmung von der Scheibenmitte hin zur A-Säule, wodurch die äußeren Rinnsale eine höhere Geschwindigkeit der Luft spüren. Durch Erhöhung der Geschwindigkeit steigt die Formwiderstandskraft auf die Rinnsale, die neben der Gravitationskraft die Fließrichtung bestimmt. Die Rinnsalform und der Abstand benachbarter Rinnsale quer zur Fließrichtung ist im Experiment und der Simulation ähnlich. Im Bereich der flächigen Filmströmung bilden sich in beiden Fällen Oberflächenwellen, die aufgrund der Luftanströmung nicht nur gerade herabfließen, sondern zusätzlich nach außen getrieben werden. Im Gegensatz zur Untersuchung ohne Luftanströmung sind die Oberflächenwellen weitaus unregelmäßiger und starten bereits in direkter Nähe des Wasseraustrittskörpers.

Während der Scheibenwischerbewegung dickt der Film am Außenkreis des Scheibenwischers auf, da ein Teil des aufgesammelten Wassers durch Zentrifugalkräfte nach außen abgegeben wird. Das restliche Wasser wird an den Wendelagen des Scheibenwischers abgegeben. Die rote Einfärbung des Ausgleichsschaums und der fahrerseitigen A-Säule im Experiment sind auf die in Abschnitt 6.4.1 genannten Punkte (durchtränktes Tuch, Aluminium-Klebeband) zurückzuführen und gelten entsprechend für die Versuche mit Luftanströmung. Der Vergleich der Frontansicht von Experiment und Simulation zur Scheibenwischermethodik mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 10 m s^{-1} weist allgemein eine große qualitative Übereinstimmung auf. Die auftretenden Phänomene der Frontscheibenbenetzung unter Einfluss der Scheibenwischerbewegung werden von der Simulation korrekt abgebildet.

In Abbildung 6.22 ist die Momentaufnahme der Seitenansicht zu sehen, bei der das Wasser gerade über die A-Säule übertritt. Die übertretende Wassermenge ist gering und fließt als Rinnsal über die A-Säule. In der Simulation ist das Rinnsal an ähnlicher Position wie im Experiment, allerdings wird die Fließrichtung des Rinnsals stärker durch die Luftströmung beeinflusst. Der Entnetzungsprozess auf der A-Säule und der Scheibe läuft im Experiment langsamer ab. Dies führt dazu, dass die Oberfläche stellenweise mit Flüssigkeit aus einem vorangegangenen Scheibenwischerzyklus benetzt bleibt.

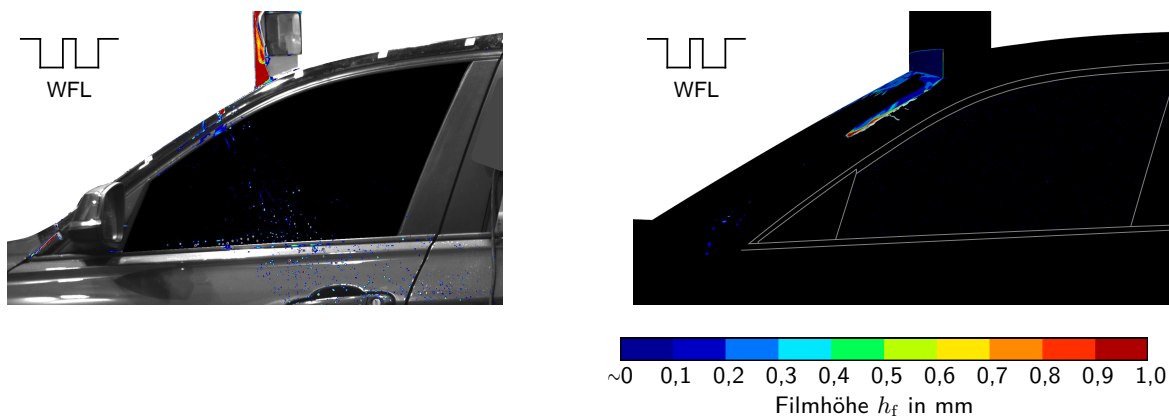


Abbildung 6.22: Vergleich der Seitenansicht von Experiment (links) und Simulation (rechts) für die Standard-Wasserfangleiste mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 10 m s^{-1} zum Zeitpunkt des Wasserübertritts an der A-Säule

In den meisten Scheibenwischerzyklen löst das ankommende Wasser nahezu vollständig an der A-Säule ab und wird mit der Luftströmung weggetragen, während der zurückbleibende Anteil entlang der Zierleiste abfließt. In diesen Fällen gelangt kein Wasser des betrachteten Scheibenwischerzyklus auf die Seitenscheibe. Dieses Phänomen ist in den Videoaufnahmen des Experiments zu beobachten. Hierbei werden vor allem die größeren Flüssigkeitsligamente in der Luft zwischen Fahrzeug und Kamerasystem detektiert, da diese aufgrund der höheren Dichte an fluoreszierenden Teilchen den vorgegebenen Helligkeitsgrenzwert eher übersteigen als feiner Sprühnebel. In der Simulation ist ein Ablösen des reinen Fluidfilms nicht möglich. In potentiellen Ablösebereichen wie der Zierleiste wird daher mit der VOF-Methode gerechnet, um ein mögliches Ablösen darzustellen. Das an der A-Säule abgelöste Fluid trifft jedoch meist nicht mehr oder erst wieder im weniger relevanten Bereich auf die Fahrzeugoberfläche, weshalb die potentiellen Bewegungspfade des Wassers durch die Luft nicht extra fein aufgelöst werden. Die genaue Trajektorie im Raum kann mit diesem Simulationsaufbau nicht verfolgt werden. Andererseits werden so etliche Volumenzellen gespart, wodurch die Rechenzeit geringer und die Berechnung überhaupt erst ermöglicht wird. Ein zukünftiges Modell, das den Übergang von VOF zu Lagrange-Partikeln erlaubt, könnte weitere Möglichkeiten eröffnen.

Daneben existieren vereinzelt Scheibenwischerzyklen, in denen die Seitenscheibe leicht benetzt wird. Das auf der Seitenscheibe ankommende Wasser fließt bedingt durch die Luftanströmung unter einem Winkel zur Vertikalen ab. Anders als bei den Untersuchungen ohne Luftanströmung wird die Seitenscheibe auch im hinteren Bereich benetzt. Die Seitenscheibe ist vorwiegend mit Tropfen benetzt, wobei die Benetzung in der Simulation schwächer als im Experiment ist. Dies kann zum einen an der angesprochenen, gröberen Auflösung des wandferneren Bereichs, wodurch ein schnellerer Abtransport der in diesen Bereich kommenden Flüssigkeit mit der Luftströmung begünstigt wird, und zum anderen an einer nicht überschrittenen Mindestschwelle der Benetzung liegen. Im Experiment existieren wenige, dafür gut sichtbare Tropfen und Rinnsalfragmente, wohingegen in der Simulation nur sehr kleine, verteilte Tropfen auf der Scheibe zu sehen sind. Aufgrund der geringen Dicke und Volumina werden die Tropfen weder durch die Gravitation noch durch die Luftströmung maßgeblich beeinflusst. Die Adhäsionskraft, die gegen die Bewegung der Tropfen wirkt, ist in diesem Fall dominierend. Die Tropfen können folglich bereits aus einem der vorherigen Scheibenwischerzyklen stammen.

Der Einfluss der Luftströmung auf die VOF-Wasserphase wird in der Simulation überbewertet, was in Abbildung 6.22 anhand der unterschiedlichen Rinnsalfließwinkel auf der A-Säule ableitbar ist. Dies resultiert in einer stärkeren Gewichtung der aerodynamischen Kräfte im Vergleich zur Gravitationskraft und in einem schnelleren Abtransport der Flüssigkeitsphase mit der Luftströmung. Dieses Verhalten wurde ebenfalls in [1] anhand von VOF-Simulationen am Außenspiegel beobachtet und wird hier für einen anderen Anwendungsfall bestätigt. Die angreifende Luftkraft kann durch Reduktion des in die Simulation übertragenen Kontaktwinkels abgeschwächt werden. Ein kleinerer, vorgegebener Kontaktwinkel erhöht die Hydrophilie der Oberfläche, wodurch die Flüssigkeit von der Festkörperoberfläche stärker angezogen wird und diese bei gleichem Flüssigkeitsvolumen eine geringere Höhe aufweist. Die Flüssigkeit steht weniger hoch in der Luftströmung und erfährt eine geringere Luftwiderstandskraft durch eine kleinere Stirnfläche und eine niedrigere, effektive Angriffsgeschwindigkeit der Luft. Abbildung 6.23 stellt den Rinnsalfließwinkel auf der A-Säule für das Experiment, eine Simulation mit übereinstimmendem Kontaktwinkel zum Experiment und eine mit um 20° reduziertem Kon-

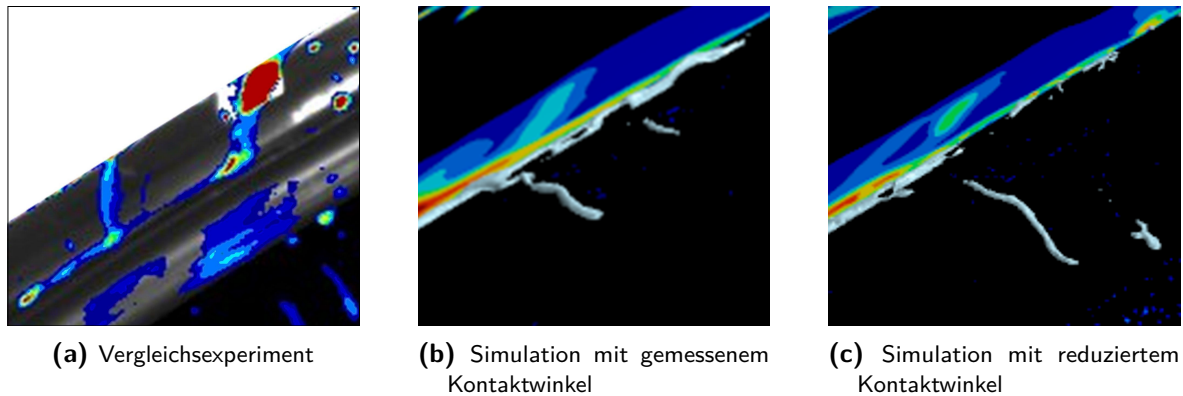


Abbildung 6.23: Gegenüberstellung des Rinnsalverlaufs beim Übergang über die A-Säule für die Standard-Wasserfangleiste mit einer Luftströmungsgeschwindigkeit von 10 m s^{-1} zum Zeitpunkt des Wasserübertritts an der A-Säule

taktwinkel gegenüber. Bei Abbildung 6.23b werden die aerodynamischen Kräfte überschätzt, was in einem stärker abgelenkten Rinnsal resultiert, wohingegen der Rinnsalfließwinkel in Abbildung 6.23c durch Reduktion des Kontaktwinkels dem Experiment angenähert wird.

Ein möglicher Grund für den Unterschied zwischen dem im Experiment gemessenen und dem in der Simulation für die VOF-Wasserphase benötigten Kontaktwinkel könnte mit der Kontaktwinkelmessung zusammenhängen. Der experimentell mit dem Handmessgerät von KRÜSS bestimmte Kontaktwinkel stellt einen statischen Kontaktwinkel dar, der anhand eines auf der Oberfläche ruhenden Tropfens ermittelt wird. Er kann theoretisch sämtliche Werte innerhalb der Kontaktwinkelhysterese annehmen, bei denen sich die Dreiphasenkontaktlinie in Ruhe befindet (vgl. Abschnitt 3.4). Der in der Simulation vorgegebene, reduzierte Kontaktwinkel kann somit trotz Abweichung zum Messwert im Gültigkeitsbereich zwischen fortschreitendem und rückschreitendem Kontaktwinkel liegen.

Wie zuvor beschrieben führt die Reduktion des Kontaktwinkels zu einer Abnahme des Einflusses der Luftströmung auf die Wasserphase. Zugleich verringert sich die Neigung des Wassers von der A-Säulenoberfläche abzulösen, wodurch die Seitenscheibe in einzelnen Scheibenwischerzyklen etwas stärker benetzt wird. Ein solches, eher seltenes Beispiel zeigt die Gegenüberstellung einer Momentaufnahme der Seitenansicht in Abbildung 6.24 mit reduziertem Kontaktwinkel in der Simulation. Die Benetzung der Seitenscheibe liegt sowohl im Experiment als auch in der Simulation in Form eines Rinnsals vor, das kaum mäandriert und unter einem ähnlichen Winkel die Scheibe herabfließt. Im Vergleich zum Validierungsfall ohne Luftanströmung (siehe Abbildung 6.16) wird das Rinnsal sichtbar abgelenkt. Es sei angemerkt, dass die Seitenscheibe beim Großteil der Scheibenwischerzyklen nicht oder nur mit einzelnen Tropfen bzw. kleinen Rinnsalfragmenten benetzt wird und das gezeigte Beispiel ein eher selten vorkommendes Benetzungsmuster repräsentiert.

Der prozentuale Wasseranteil, der während der Scheibenwischerbewegung über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste abfließt, ist in Abbildung 6.25 für beide A-Säulenvarianten unter Luftanströmung dargestellt. Die mehrfach durchgeführten Messungen im UWK werden mit den Simulationen mit vorgegebenem Kontaktwinkelteppich verglichen. Sowohl im Experiment als auch in der Simulation nimmt der prozentuale Wasseranteil im Vergleich zu den

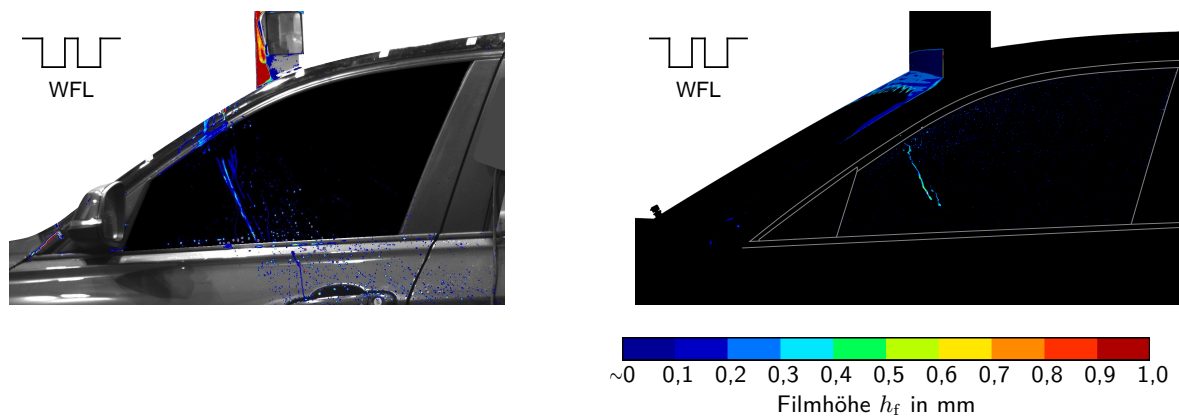


Abbildung 6.24: Vergleich der Seitenansicht von Experiment (links) und Simulation (rechts) für die Standard-Wasserfangleiste mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 10 m s^{-1} und reduziertem Kontaktwinkel auf der A-Säule

Untersuchungen ohne Luftanströmung ab. Zum einen wird bereits ohne Scheibenwischerbewegung eine geringe Wassermenge durch die Luftströmung über die A-Säule befördert und zum anderen begünstigt die Luftströmung das Überströmen der Wasserfangleiste. Gemäß der Messungen fließen bei der Standard-Wasserfangleiste etwa 60 % und bei der geschlossenen Wasserfangleiste noch etwa 36 % durch den Motorraum (orange Punkte in Abbildung 6.25). Die Streuung im Experiment beträgt rund 5 %. Der berechnete Wasseranteil in den Vergleichssimulationen mit Kontaktwinkelteppich liegt jeweils leicht unterhalb des Mittelwerts der Experimente (grüne, dreieckige Marker in Abbildung 6.25). Die Änderung des Wasseranteils von der Standard-Wasserfangleiste zur geschlossenen Wasserfangleiste (Deltabetrachtung) wird in der Simulation korrekt vorhergesagt und entspricht im Übrigen dem gleichen Wert wie bei den Untersuchungen ohne Luftanströmung in Abschnitt 6.4.2.

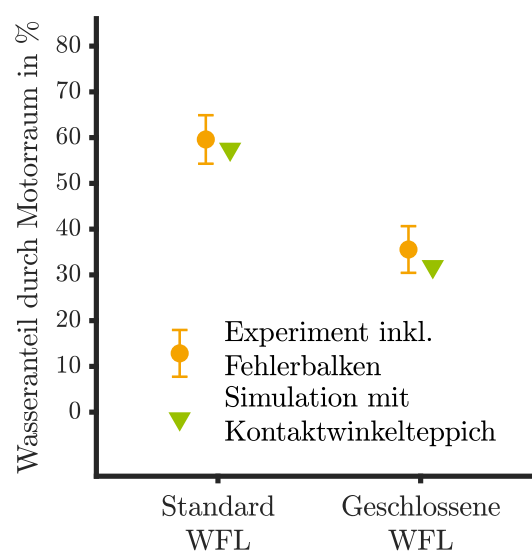


Abbildung 6.25: Prozentualer Anteil des über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste abfließenden Wassers für verschiedene A-Säulenvarianten bei einer Luftanströmung mit 10 m s^{-1}

Tabelle 6.3: Mittlere Rinnsalfließgeschwindigkeit und deren Standardabweichung für Experimente und Simulationen mit einer Luftanströmung von 10 m s^{-1} mit der Standard-Wasserfangleiste und der geschlossenen Wasserfangleiste

	Experiment/ Simulation	Wasserzulauf \dot{m}_{zu} in kg min^{-1}	Kontakt- winkel θ in $^\circ$	Rinnsalfließgeschwindigkeit	
				$\overline{u_r}$ in m s^{-1}	$\delta(u_r)$ in m s^{-1}
Std.-WFL	Experiment	1,5	37 ± 4	0,14	0,04
	Simulation	1,5	40*	0,15	0,02
geschl. WFL	Experiment	1,2	37 ± 4	0,13	0,05
	Simulation	1,2	40*	0,14	0,02

* mit Vorgabe eines Kontaktwinkelteppichs

Die Ergebnisse der Rinnsalfließgeschwindigkeit zu den Versuchen und den Simulationen mit Wasseraustrittskörper bei einer Luftanströmung von 10 m s^{-1} sind für beide A-Säulenvarianten in Tabelle 6.3 aufgelistet. Im Vergleich zu den Untersuchungen ohne Luftanströmung sind die Fließgeschwindigkeiten der Rinnsale geringer, was neben der Luftanströmung aus dem leicht niedrigeren Wassermassenzulauf resultiert. Die dimensionslose Filmreynoldszahl beträgt hier etwa 23 für den zugeführten Wassermassenstrom von $1,5 \text{ kg min}^{-1}$ (entspricht einer Flüssigkeitsbelastung von $23 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) und etwa 18 bei $1,2 \text{ kg min}^{-1}$ (bzw. $18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Während die meisten Rinnsale durch die entgegen gerichtete Luftströmung geringfügig gebremst werden, beschleunigt die Luftströmung die stärker abgelenkten Rinnsale nahe der A-Säule. Die Rinnsalfließgeschwindigkeit von Experiment und Simulation unter Luftanströmung passt erneut sehr gut zusammen.

6.4.4 Fazit zur Validierung

Die in diesem Abschnitt gezeigte Validierung berücksichtigt neben der qualitativen Gegenüberstellung von Benetzungsmustern auch quantitative Vergleichsgrößen. Dazu werden zwei A-Säulenvarianten bei verschiedenen Geschwindigkeiten der Luftanströmung und verschiedenen, zugeführten Wassermassenströmen untersucht. Für alle betrachteten Fälle zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Experimente mit der jeweiligen, gesamtheitlichen Vergleichssimulation; gesamtheitlich bedeutet in diesem Kontext die Abbildung aller relevanten Vorgänge in einer einzigen Simulation. In der Literatur hingegen werden einzelne Teilaspekte der Sichtfreihaltung wie beispielsweise der Tropfeneinschlag auf einer Fahrzeugoberfläche, die Wasserverdrängung durch die Scheibenwischer, die meist unter Vernachlässigung der Scheibenwischergeometrie mittels Impuls- und Massenquellen realisiert wird, oder der Verlauf eines Rinnsals auf der Seitenscheibe getrennt voneinander analysiert. Dies hat den Nachteil, dass die Ergebnisse teilweise stark von den oft nicht genau bekannten Start- und Randbedingungen

abhängig sind. So ist zum Beispiel der Verlauf eines Rinnsals auf der Seitenscheibe vom vorgegebenen Wassereintrittspunkt nahe der A-Säule abhängig. Der Vorteil einer Teilaspekt-Betrachtung liegt jedoch im deutlich geringeren Aufwand und der schnelleren Durchlaufzeit im Vergleich zur gesamtheitlichen Betrachtung. Vor allem aufgrund des hohen Aufwands und der langen Rechenzeit sind gesamtheitliche Simulationen zur Sichtfreihaltung in der Literatur nicht vorhanden oder werden nur mit extremen Vereinfachungen durchgeführt.

Durch Kopplung des Filmmodells mit der Volume-of-Fluid-Methode und Definition von Bereichen zur Verwendung des jeweiligen Verfahrens über die Zellgröße und den Grenzwert des Volumenanteils wird für den hier vorgestellten Fall zur Sichtfreihaltung die Rechenzeit reduziert und eine gesamtheitliche Simulation ermöglicht. In Kombination mit eingeführten Erweiterungen, wie z. B. der Implementierung zur Vorgabe einer Kontaktwinkelstreuung auf den Oberflächen, lassen sich hohe Übereinstimmungen mit den durchgeführten Experimenten erzielen. Die Änderung des über die A-Säule beförderten Wasseranteils durch den Wechsel von einer zur anderen A-Säulenvariante oder durch Erhöhung der Luftanströmgeschwindigkeit wird von den Simulationen korrekt wiedergegeben. Dies stärkt das Vertrauen in komplexe Mehrphasensimulationen und ermöglicht grundlegende, numerische Untersuchungen mit variierten A-Säulengeometrien bereits in frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung.

Übertragbarkeit auf Sichtfreihaltungsversuch

Die in Kapitel 6 erfolgreich validierte Scheibenwischermethodik wird in diesem Kapitel hinsichtlich der Übertragbarkeit und des Vergleichs mit einem klassischen Versuch zur Seitenscheibenbenetzung im Umweltwindkanal überprüft. Eine der größten Herausforderungen ist nach wie vor die unterschiedlich lange, physikalische Zeitspanne von Experiment und Simulation. Ein Versuch zur Seitenscheibenbenetzung wird über mehrere Minuten aufgezeichnet, wobei sich der zeitliche Verlauf des Benetzungsgrades in eine Initialphase und eine quasistationäre Phase untergliedert [162]. Charakteristische Kenngrößen wie der Benetzungsgrad B_G und die Häufigkeitsverteilung der Benetzung auf der Seitenscheibe werden aus einem möglichst großen Zeitbereich in der quasistationären Phase ermittelt. Im Gegensatz dazu kann die betrachtete, physikalische Zeitspanne einer Mehrphasensimulation aufgrund der enormen Rechenkosten nur wenige Sekunden lang sein (vgl. Abschnitt 4.6). Durch vorangegangene Simulationen am gesamten Fahrzeug zur Fahrzeugum- und -durchströmung (siehe Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.4) sowie zum Wassereintrag durch Lagrange-Partikel (siehe Abschnitt 7.1) kann die aufwendige Mehrphasensimulation mit bewegten Scheibenwischern auf der Frontscheibe in einer kleineren Simulationsregion analog zur entwickelten Methodik in Abschnitt 6.4 untersucht werden (Abbildung 7.1). Die Volumenvernetzung der Ausschnittsimulation wird für die einzelnen Bereiche (OSM-Bereich, VOF-Bereich, Filmregion, Übergangsbereich zwischen Fluidfilm und VOF) geeignet angepasst. Die vorab bestimmten Strömungsfeldgrößen und der Wassermassenstrom pro Flächeneinheit dienen als Anfangs- und Randbedingungen der Ausschnittsimulation. Das Verfahren zur Vorgabe der Strömungsgrößen wurde bereits in Abschnitt 5.4 beschrieben und zur Validierung der Scheibenwischermethodik unter Luftanströmung in Abschnitt 6.4 herangezogen. Zusätzlich wird der mittlere Massenstrom pro Flächeneinheit, der aus einer Simulation mit Lagrange-Partikeln resultiert, zur Initialisierung und als Quelle der Wasserphase verwendet. Der Wassereintrag in die Lagrange-Simulation wird anhand der resultierenden, effektiven Sprühkegel für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten der Luftströmung validiert. Zum Abgleich der am Fahrzeug ankommenden Wassermenge mit den durchgeführten Simulationen werden Validierungsexperimente konzipiert und für eine Folgearbeit festgehalten (siehe Abschnitt 7.1).

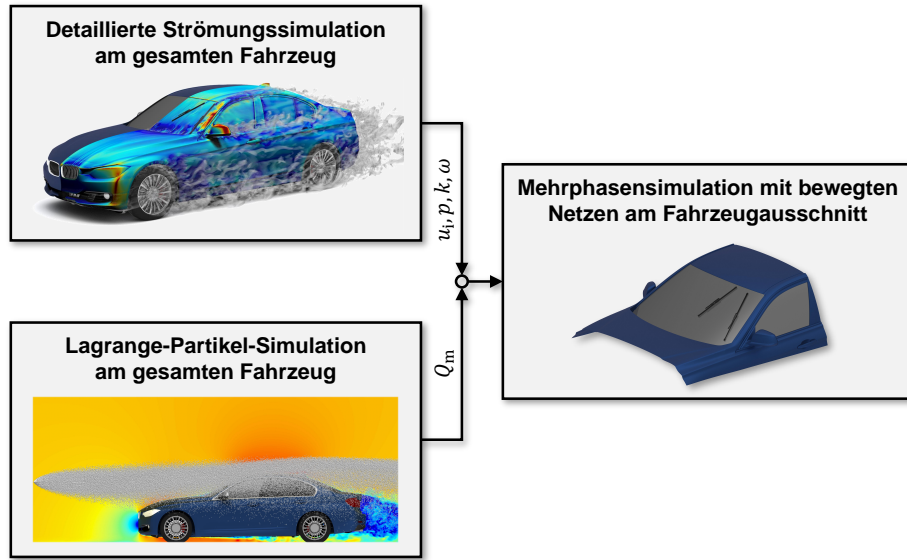


Abbildung 7.1: Eine detaillierte Strömungssimulation und eine Lagrange-Partikel-Simulation am gesamten Fahrzeug dienen als Anfangs- und Randbedingungen für die Mehrphasensimulation am Fahrzeugausschnitt

7.1 Simulation der im UWK eingebrachten Wasserpartikel

Bei einer nachgestellten Regenfahrt im Umweltwindkanal werden fein zerstäubte Wassertropfen hinter der Windkanaldüse in die Strömung eingebracht und mit der Luftströmung zum Fahrzeug transportiert, wo sie die Fahrzeugoberfläche benetzen. In Abhängigkeit der vorherrschenden Bedingungen tritt beim Tropfenaufprall eines der nachfolgenden Ereignisse ein: Rebound, Stick, Spread oder Splash (siehe Abschnitt 3.5). Die exakte zurückbleibende Wassermenge auf der Fahrzeugoberfläche ist dabei unbekannt. Zur Untersuchung der auftreffenden Wassermenge werden Simulationen mit Lagrange-Partikeln durchgeführt. Der Wassereintrag erfolgt analog zum Seitenscheibenbenetzungsversuch im UWK über vier Sprühdüsen auf einer Höhe von 1280 mm über dem Windkanalboden. Zwischen den einzelnen Sprühdüsen ist jeweils ein Abstand von 500 mm in globale y -Richtung, wobei die äußerste Düse in y -Richtung auf den fahrerseitigen Außenspiegel gerichtet wird. Insgesamt wird ein Wasservolumenstrom von $0,11 \text{ l s}^{-1}$ in das System eingebracht (siehe Abschnitt 4.1.2). Jeder der vier Injektoren (Fulljet 2.8W Düse [148]) besitzt die gleiche, in Tabelle 7.1 aufgeführte Sprühcharakteristik. Die Tropfendurchmesserverteilung im UWK wurde in [162] mit dem Laserbeugungssystem Spraytec von MALVERN [109] vermessen. Die detektierte Tropfendurchmesserverteilung mit einem Mittelwert um 0,5 mm ist kleiner als bei natürlichem Regen. Grundsätzlich ist die Erzeugung von größeren Tropfen durch die Nutzung anderer Sprühdüsen möglich, allerdings würden diese aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeit zwischen den emittierten Tropfen und der Luftströmung ohnehin zügig zerfallen (Weberzahl als Maß für die Stabilität) [48, 162].

Aus dem Volumenstrom je Injektor und der mittleren Partikelgröße kann die Anzahl der Partikel pro Zeitschritt abgeschätzt werden. Mit dem für die Abschätzung konstant angenommenen, mittleren Tropfenvolumen von

$$V_{\text{Tropfen}} = \frac{1}{6} \pi d_p^3 = 6,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \quad (7.1)$$

Tabelle 7.1: Sprühcharakteristik der verwendeten Fulljet 2.8W Düse

Bezeichnung	Einstellung
Injektortyp	Weitwinkel-Vollkegelspray
Öffnungswinkel	120°
Sprühachse	in positive x -Richtung
Volumenstrom	0,025 l s ⁻¹
Partikeldurchmesser	Verteilung mit 0,5 mm Referenzdurchmesser

treten pro Injektor rund 76 Partikel in jedem Zeitschritt ($\Delta t = 2 \cdot 10^{-4}$ s) in die Simulationsdomain ein. Sollte bei einer höheren Anströmgeschwindigkeit der Zeitschritt zur Erfüllung der CFL-Bedingung beispielsweise halbiert werden, sind es dementsprechend nur noch halb so viele Partikel. Für jede Sprühdüse wird die Anzahl der Partikelpakete (Zusammenfassung von Partikeln gleicher Eigenschaft, sogenannte Parcel) vorgegeben, sodass jedes Partikelpaket rund zwei Partikel beinhaltet. Die hohe Anzahl der Partikelpakete ist zwar rechenintensiv, führt allerdings zu einer hohen Genauigkeit. Allgemein kann festgehalten werden: Je mehr Partikelpakete eingesetzt werden, desto genauer werden die Partikelverteilungen bei gleichzeitig steigendem Rechenaufwand bestimmt. Die benötigte Rechenzeit wächst dabei proportional zur Anzahl der Partikelpakete an [145].

Mit der Lagrange-Mehrphasensimulation, die abgesehen von der zusätzlichen Lagrange-Phase ähnlich wie die Simulation zur Berechnung der Grenzschicht in Abschnitt 5.1.1 aufgebaut ist, wird die auftreffende Wassermenge und das Auftreffmuster von Partikeln auf der Fahrzeugoberfläche untersucht. Die relevanten Regionen sind insbesondere die Frontscheibe sowie die gesamte A-Säule. Auf der Frontscheibe sammeln die Scheibenwischer das abgesetzte Wasser in einem großen Bereich auf und befördern dieses in Richtung der A-Säule. Die genaue Verteilung der Tropfen spielt deshalb nur eine untergeordnete Rolle. Dahingegen ist die Tropfenverteilung auf den Oberflächen der A-Säule von größerem Interesse, da dadurch eine Vorbenetzung erzeugt wird, die den Wasserübergang über die A-Säule beeinflusst. Die Partikelbewegungen werden mit einer Zweivegekopplung berechnet, wodurch sowohl der Einfluss von der kontinuierlichen Phase auf die disperse Phase als auch der Einfluss von der dispersen Phase auf die kontinuierliche Phase berücksichtigt wird (vgl. Abschnitt 4.4.1). Nach [65] ist bereits die Einwegekopplung für Wassermanagement-Simulationen ausreichend.

Je kleiner die eingebrachten Partikel sind, desto eher folgen sie der Luftströmung. Dies führt dazu, dass ein Teil der Partikel (insbesondere die sehr kleinen und leichten Partikel) die Fahrzeugoberfläche nicht trifft. Wird die Geschwindigkeit der Anströmung erhöht, verstärkt sich dieser Effekt und das Auftreffmuster der Tropfen verschiebt sich auf der Windschutzscheibe nach oben. Bei größeren Tropfendurchmessern ist die Ablenkung durch aerodynamische Kräfte geringer, wodurch diese mit einer höheren Wahrscheinlichkeit auf die Fahrzeugoberfläche treffen. Größere Tropfen haben demnach eine höhere Relevanz bei der Untersuchung der auf eine Oberfläche treffenden Wassermenge, zumal das Volumen von kugelförmigen Tropfen proportional zur dritten Potenz des Radius ist.

Tabelle 7.2: Resultierende Sprühkegel bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten

Anström- geschwindigkeit	Effektiver Sprühkegel	
	Experiment [162]	Simulation
0 km h ⁻¹	120°	120°
60 km h ⁻¹	100°	(102 ± 2)°
80 km h ⁻¹	90°	(90 ± 2)°
100 km h ⁻¹	80°	(80 ± 2)°
120 km h ⁻¹	70°	(72 ± 2)°

Die Simulation mit Lagrange-Partikeln wird für die Anströmgeschwindigkeiten von 60 km h⁻¹, 80 km h⁻¹, 100 km h⁻¹ und 120 km h⁻¹ durchgeführt. Je nach Luftgeschwindigkeit stellt sich bei gleichbleibender Vorgabe eines 120°-Weitwinkelsprays ein effektiver Winkel des Sprühkegels ein. Bei einer höheren Anströmgeschwindigkeit wird das Wasserspray stärker in x -Richtung beschleunigt und der effektive Sprühkegel wird eingeschnürt. In Tabelle 7.2 sind die sich einstellenden Öffnungswinkel aus der Simulation mit den in [162] abgeschätzten Sprühkegeln im UWK für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten gegenübergestellt. Der Öffnungswinkel wird im Bereich kurz nach dem Eintreten der Partikel in die Simulationsregion gemessen. In diesem Bereich ist die begrenzende Partikelbahn relativ geradlinig und der Sprühkegel hat bereits seine Form angepasst. Zur Auswertung wird eine Ansicht in negative z -Richtung gewählt, um einerseits die Partikel jeder Sprühdüse individuell zu vermessen und andererseits mögliche Asymmetrien des Sprühkegels aufgrund der wirkenden Gravitation auszuschließen. Für alle untersuchten Geschwindigkeiten ist der Öffnungswinkel des Sprühkegels genauso groß wie im Experiment (siehe Tabelle 7.2). Wird die Simulation mit einem Fahrzeug in der Messstrecke durchgeführt, werden die Partikel zusätzlich durch das Aufstaugebiet vor dem Fahrzeug und die veränderten Strömungsverhältnisse beeinflusst.

Das Ziel der Untersuchungen in diesem Abschnitt ist, den auf der Fahrzeugoberfläche ankommenden Wassermassenstrom als Anfangs- und Randbedingung für die Scheibenwischersimulation am Fahrzeugausschnitt zu ermitteln. Zum Abgleich des mittels Lagrange-Simulationen bestimmten Wassermassenstroms auf die Frontscheibe mit dem im Umweltwindkanal auftreffenden Wassermassenstrom wurden Validierungsversuche konzipiert. Die Überlegungen und durchgeführten Konstruktionen werden an dieser Stelle für Folgearbeiten festgehalten, da die Versuchsdurchführung noch aussteht. Die Grundidee besteht aus einer nachkonstruierten Windschutzscheibe mit Aussparungen für gleichmäßig unterteilte Auffanggitter, um die ankommende Flüssigkeitsmenge und -verteilung zu charakterisieren. Die einzelnen Auffangtrichter leiten die ankommende Wassermenge in einem hydrophobierten Kanal zum Messsystem von SPRAYPATTERNATOR [149], einem Forschungsprojekt der TU Darmstadt. Die Messeinheit ermittelt die Wassermenge jedes Trichters vollautomatisch und erlaubt eine Leerung des Systems während des Betriebs, wodurch die Messung im eingeschwungenen Zustand des Windkanals genullt werden kann.

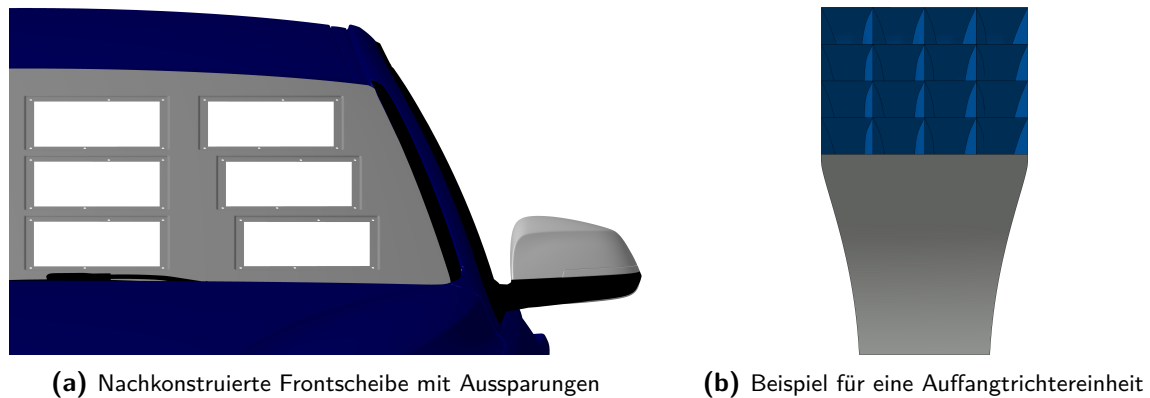


Abbildung 7.2: Frontansicht der nachkonstruierten Frontscheibe mit Aussparungen für den Einsatz von 3D-gedruckten Auffangtrichtern und Beispiel einer Auffangtrichtereinheit mit 16 Einzeltrichtern, die mit dem Messsystem von SprayPatternator verbunden werden

Die nachkonstruierte Frontscheibe besitzt aus Stabilitätsgründen nur auf der Fahrerseite auf drei verschiedenen Höhenniveaus Aussparungen. Die einzelnen Reihen sind mit einem Steg voneinander getrennt und weisen jeweils zwei längliche Ausschnitte auf. Während der in der Draufsicht linke Ausschnitt in allen drei Reihen an der Scheibenmitte angrenzt, sind die rechten Ausschnitte treppenförmig angeordnet, um bei der nach unten breiter werdenden Frontscheibe das aufkommende Wasserspray möglichst nahe an der A-Säule zu detektieren (vgl. Abbildung 7.2a). In Fahrzeuginnenachse (x -Achse des globalen Koordinatensystems) sind die Ausschnitte gleich groß dimensioniert mit einer Breite von etwa 240 mm und einer Höhe von 90 mm.

Jeder Scheibenausschnitt besitzt eine umlaufende Stufe, auf der das 3D-gedruckte Auffanggitter mit einer Polymerdichtung aufliegt. Unter Windlast ergibt sich eine selbstverstärkende Abdichtung. Zusätzlich werden die Auffangtrichter über Verschraubungen mit der nachkonstruierten Frontscheibe fixiert. Die konstruierten Auffangtrichter werden per additiver Fertigung hergestellt. Sie sind an die Scheibenkrümmung angepasst und besitzen in Fahrzeuginnenachse gleichgroße, regelmäßig verteilte Einzeltrichter, die das ankommende Wasser auffangen und in einem hydrophob beschichteten Kanal zur Messeinheit weiterleiten (siehe Abbildung 7.2b). Die Kanäle der Trichter weisen in der Seitenansicht stets ein Gefälle auf, sodass das aufgefangene Wasser durch die Gravitation zur Messeinheit von SPRAYPATTERNATOR fließt. Der Kanalquerschnitt wird dabei von einem Rechteck in einen Kreis überführt. Pro Ausschnitt werden zwei Messeinheiten mit je 16 einzelnen Messkammern verbunden. Des Weiteren werden die 32 Auffangtrichter eines Ausschnittes mit einer Wasserfalle (ähnlich einem Burggraben) umrahmt. Die Falle verhindert, dass auf der Scheibe durch Luftströmung und/oder Gravitation fließendes Wasser in die Auffangtrichter gelangt, indem sie überschüssiges Wasser aufnimmt und weggleitet. Mit dieser Maßnahme wird sichergestellt, dass lediglich die direkt auftreffenden Wassertropfen detektiert werden.

Für die Versuche wird die Serienfrontscheibe des Versuchsfahrzeugs mit der nachkonstruierten Scheibe ersetzt, die beispielsweise im Schicht-Laminat-Verfahren mit Faserverbundwerkstoffen gefertigt ist. Da die Fahrzeuggeometrie ansonsten gleich bleibt, liegen bei den Messungen im UWK vergleichbare Strömungsverhältnisse wie beim klassischen Versuch zur

Sichtfreihaltung vor. Die Ausschnitte werden nacheinander mit den Auffangtrichtern bestückt und bei den zu untersuchenden Geschwindigkeiten vermessen. Während der Messung sind die restlichen Ausschnitte je mit einem 3D-gedruckten Scheibenstück verschlossen, um die Fahrzeugumströmung so wenig wie möglich zu beeinflussen. Die Messungen werden für alle Aussparungen der Frontscheibe mehrfach durchgeführt und gemittelt. Anschließend können die mittleren Massenströme zu einer Anströmgeschwindigkeit mit der Simulation verglichen werden.

In der Simulation wird der auf der Fahrzeugoberfläche auftreffende Massenstrom nach Erreichen eines eingeschwungenen Zustands gemittelt und gespeichert. Er wird zur Initialisierung und als Flüssigkeitsquelle in der Scheibenwischersimulation am Fahrzeugausschnitt verwendet. Obwohl die Sprühdüsen nicht getauscht werden und der eingebrachte Wasservolumenstrom konstant bleibt, ändert sich der mittlere Massenstrom auf der Frontscheibe mit Variation der Anströmgeschwindigkeit. Mit steigender Geschwindigkeit nimmt der Einfluss der Luftkräfte auf die Partikel zu und diese werden stärker abgelenkt. Demgegenüber steht die Einschnürung des Sprühkegels, wodurch über die Breite mehr Partikel auf die Frontscheibe treffen. Der Effekt, dass bei einer größeren Luftgeschwindigkeit eine erhöhte Wassermenge auf der Fahrzeugoberfläche landet, ähnelt der Zunahme der auf einen Pkw treffenden Regenmenge während einer realen Regenfahrt. Das Fahrzeug nimmt die vertikal fallenden Regentropfen zusätzlich in horizontaler Fahrtrichtung auf. Dies kann mithilfe der windgetriebenen Regenintensität (wind-driven rain) aus der Gebäude- und Umweltaerodynamik [17] verdeutlicht werden. Der Ansatz beschreibt die Korrelation zwischen ungestörter, in einer horizontalen Fläche gemessenen Regenintensität R_h und der Intensität des windgetriebenen Regens auf eine vertikale Fläche R_{wdr} . Der Zusammenhang wird über das Verhältnis der horizontalen Windgeschwindigkeit u_{wind} und der mittleren, tropfengrößenabhängigen Fallgeschwindigkeit der Regentropfen u_{fall} nach Gl. (7.2) gebildet [17].

$$R_{wdr} = \frac{u_{wind}}{u_{fall}} R_h \quad (7.2)$$

LACY [92] vereinfacht diese Gleichung unter Ausnutzung von Beziehungen zwischen Regenintensität und mittlerem Tropfendurchmesser sowie Tropfendurchmesser und Fallgeschwindigkeit der Tropfen. Dadurch ermöglicht er eine Abschätzung der vom Fahrzeug wahrgenommenen Regenintensität R_{wdr} , die nach Gl. (7.3) nur noch von der Fahr- bzw. Windgeschwindigkeit u_{wind} und der in einer horizontalen Fläche gemessenen Regenintensität R_h abhängig ist.

$$R_{wdr} = 0,222 u_{wind} R_h^{0,88} \quad (7.3)$$

7.2 Phänomene der Seitenscheibenbenetzung

Die Benetzung der Seitenscheibe bei einem Sichtfreihaltungsversuch im Umweltwindkanal unterscheidet sich je nach Fahrzeugmodell und Anströmgeschwindigkeit bei gleichem Wassereintrag und Messsystemaufbau. Die Benetzungsmuster werden durch die Fahrzeugform, die Ausgestaltung der A-Säule (siehe Abschnitt 3.6 zu den geometrischen Stellhebeln), die

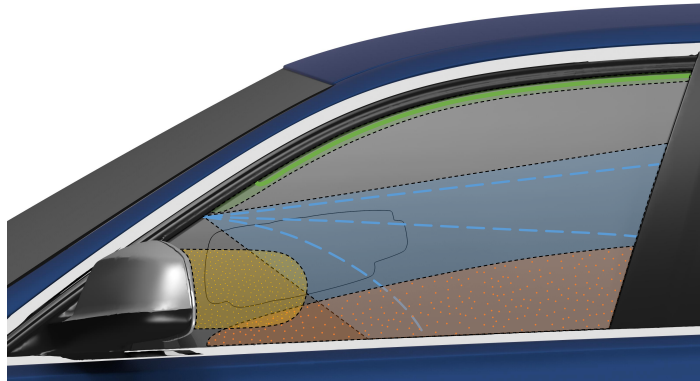


Abbildung 7.3: Typische Phänomene der Seitenscheibenbenetzung mit Markierung des Sichtfensters in der Seitenscheibe (gelb - direkter Tropfenaufprall, orange - vom Außenspiegel ablösende und zur Scheibe getragene Tropfen, grün & blau - über die A-Säule tretende Flüssigkeit)

Luftströmungsgeschwindigkeit und die daraus resultierende Fahrzeugumströmung beeinflusst. Nichtsdestotrotz weisen die unterschiedlichen Benetzungsmuster der Seitenscheibe oft ähnliche, in Abbildung 7.3 skizzierte Phänomene auf:

- direkter Tropfenaufprall auf die Seitenscheibe,
- Tropfen, die vom Außenspiegel ablösen und mit der Luftströmung zur Scheibe getragen werden, oder
- durch die Scheibenwischer zur A-Säule befördertes Wasser, das die A-Säule übertritt.

In [162] werden zusätzliche Phänomene aufgeführt, die durch Eigenverschmutzung oder durch Fremdverschmutzung aufgrund anderer Verkehrsteilnehmer verursacht werden. Die direkte Benetzung durch große Regentropfen, wie sie bei einer Regenfahrt mit niedriger Fahrgeschwindigkeiten auf der Straße auftritt, ist im UWK nicht abbildbar, da die eingebrachten Tropfen – wie in Abschnitt 7.1 beschrieben – klein sind und mit der Luftströmung zum Fahrzeug getragen werden. Große Tropfen lassen sich ohnehin kaum bis nicht durch Geometrievariationen und der dadurch veränderten Umströmung ablenken. Dagegen können kleinere Tropfen der turbulenten Umströmung im Bereich des Außenspiegels folgen, was im ungünstigen Fall zu einer Benetzung in Form von Sprühnebel in Nähe des Sichtfensters führt (gelber Bereich in Abbildung 7.3). Vom Außenspiegel abtropfendes Wasser kann in einer Benetzung der Seitenscheibe resultieren. Die Tropfen werden mit der Luftströmung transportiert und lagern sich insbesondere stromabwärts im unteren Bereich der Seitenscheibe ab (roter Bereich in Abbildung 7.3). Die bisher genannten Phänomene führen hauptsächlich zu einer Benetzung der Seitenscheibe mit kleinen Wassertropfen. Durch Koaleszenz von Einzeltropfen bilden sich immer größere Tropfen, die ab einer gewissen Dimension durch Gravitation und Aerodynamik getrieben zu wandern beginnen.

Der mengenmäßig größte Anteil der Seitenscheibenbenetzung resultiert erfahrungsgemäß aus dem A-Säulenübertritt des durch die Scheibenwischer und zur A-Säule geschobenen Wassers. Die Gestaltung der A-Säule mit Wasserfangleiste, Rinnen, Zierleiste und Fensterführung beeinflusst diesen Wasserübertritt. Sie ist so zu gestalten, dass möglichst viel Wasser in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit durch Gravitation zum Windlauf oder durch aerodynamische Kräfte über das Fahrzeugdach abgeführt wird. Da bei der Auslegung des Wasserfang-

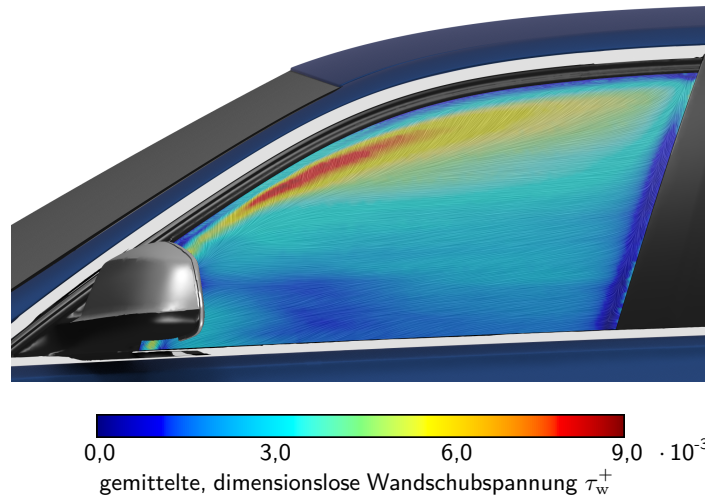


Abbildung 7.4: Gemittelte, dimensionslose Wandschubspannung und Stromlinien auf der Seitenscheibe bei einer Anströmgeschwindigkeit von 80 km h^{-1}

und -führungskonzeptes der A-Säule zusätzliche Aspekte wie der Luftwiderstand oder die Akustik Berücksichtigung finden, stellt das finale Konzept stets einen Kompromiss dar. Der Wasserübertritt kann bei gleichzeitiger Erfüllung der anderen Anforderungen somit nicht vollkommen vermieden werden. Die genaue Position des Übertritts an der A-Säule ist abhängig von der Luftgeschwindigkeit. Der Abfließwinkel des Rinnsals bzw. der Wasserligamente im blau gekennzeichneten Bereich in Abbildung 7.3 ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Gravitation und Aerodynamik. Während bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten das Wasser in dem durch die Stufe der Zierleiste geschützten Bereich herabfließt und hinter dem Spiegeldreieck eine Wasserblase ausbilden kann, liegt bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten ein ausgeprägter A-Säulenwirbel vor, der das Wasser entlang der oberen Fensterführung im grün hervorgehobenen Bereich von Abbildung 7.3 abführt. [162]

Der Pfad, den ein Rinnsal auf der Seitenscheibe einnimmt, wird maßgeblich durch die Wandschubspannung auf der Seitenscheibe beeinflusst. Abbildung 7.4 zeigt die gemittelte, dimensionslose Wandschubspannung (auch lokaler Reibungsbeiwert genannt)

$$\tau_w^+ = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2} \quad (7.4)$$

auf der vorderen, linken Seitenscheibe in der Simulation. Der Verlauf des A-Säulenwirbels mit den charakteristischen, in positive z -Koordinate gerichteten Stromlinien ist deutlich zu erkennen. Je größer die Stärke des Wirbels im Vergleich zur Wassermenge des Rinnsals und der daraus resultierenden Gewichtskraft ist, desto eher verläuft das Rinnsal nahe der oberen Fensterführung und damit außerhalb des für den Fahrer relevanten Sichtbereichs.

7.3 Vergleich Sichtfreihaltungsversuch im UWK mit Simulation

Die Simulation der Sichtfreihaltung wird – wie in Abbildung 7.1 gezeigt und ähnlich zur Scheibenwischersimulation mit Wasseraustrittskörper in Abschnitt 6.4 – in mehrere Teilsimulationen unterteilt. Diese Methodik reduziert den Berechnungsaufwand und ermöglicht in

Kombination mit einer geeigneten Modellauswahl die Untersuchung des Wasserübergangs an der A-Säule. Im Gegensatz zu einer weiteren Aufspaltung wird die Unsicherheit bei der Wahl von Randbedingungen, wie beispielsweise die genaue Position der Fingerinjektion bei einer direkten Wassereinbringung nahe der A-Säule in einem noch weiter zerlegten Simulationsfall, minimiert. Der Berechnungsaufwand einer solchen Simulation ist allerdings weiterhin enorm. Für die Berechnung von einer physikalischen Sekunde unter Luftanströmung mit 120 km h^{-1} (entspricht einer Reynoldszahl von $Re = 1,0 \cdot 10^7$) und Wasserbeaufschlagung der Fahrzeugoberfläche werden etwa 66 000 CPUh benötigt (vgl. Abschnitt 4.6). Unter Berücksichtigung, dass zur Erzeugung eines stabilen, eingeschwungenen Zustands rund vier komplette Scheibenwischerzyklen (respektive eine physikalische Zeitspanne von 6 s) benötigt werden, führt dies zu einer sehr langen Simulationszeit, weshalb nur eine geringe Anzahl an Fällen berechnet und analysiert werden kann. Die Berechnungszeit lässt sich voraussichtlich durch eine verbesserte Implementierung der umgesetzten Erweiterungen in die Software optimieren. Die aktuelle Umsetzung über benutzerdefinierte Tabellen, Feldfunktionen oder Werteüberwachung und -speicherung ist nicht ideal in Bezug auf die Rechenzeit, jedoch sind damit selbst ohne Veränderung des nicht zugänglichen Quellcodes des Softwarepakets gewisse Anpassungen möglich.

Die entwickelte Simulationsmethodik legt den Fokus auf die Phänomene des A-Säulenübertritts, die für den mengenmäßig größten Anteil der Seitenscheibenbenetzung verantwortlich sind (blau und grün markiert in Abbildung 7.3). Für Untersuchungen zum direkten Tropfenaufprall oder vom Außenspiegel abtropfenden Wasser (gelb und rot markiert in Abbildung 7.3) müsste das Simulationsmodell angepasst werden. Das Abtropfen vom Außenspiegel ist zudem häufig unkritisch, da dies einerseits bereits mit dem Außenspiegeldesign optimiert wird und andererseits ablösende Tropfen – wenn überhaupt – nur im unteren Bereich der Seitenscheibe auftreten. Des Weiteren könnte der Außenspiegel in Zukunft aus Luftwiderstands- oder Designgründen und im Zuge zunehmender Sensorik in einem Fahrzeug durch ein Kamerasystem ersetzt werden, weshalb dem Außenspiegelabtropfen eine untergeordnete Bedeutung zukommt.

Während ein Versuch für mehrere Minuten aufgezeichnet und über eine halbe Minute innerhalb der quasistationären Phase ausgewertet wird, können bei der Simulation nur wenige Sekunden berücksichtigt werden. Zur Kompensation der kürzeren Simulationsdauer im Vergleich zur Realität wird die mittels Lagrange-Simulationen berechnete Wasserbeaufschlagung in der Ausschnittsimulation verdoppelt. Die Benetzung der Frontscheibe während der Scheibenwischerbewegung ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Zur Analyse der Benetzungshäufigkeit in einer Simulation wird diese in Form einer eigenen Auswertegröße berechnet. Dazu wird in äquidistanten Zeitabständen für jede Zelle auf den relevanten Oberflächen überprüft, ob die Benetzung größer als der vorgegebene Grenzwert ist. Ist der Grenzwert überschritten, wird der Zähler der jeweiligen Zelle um Eins erhöht. Bei Verwendung des hybriden Mehrphasenmodells ist die Überprüfung und die Speicherung sowohl für den Fluidfilm als auch für die VOF-Wasserphase erforderlich. Da die Film- und die VOF-Werte in unterschiedlichen Regionen gespeichert werden, müssen die gespeicherten Häufigkeiten zur gleichzeitigen Betrachtung auf eine gemeinsame Region übertragen werden. Durch Addition beider Häufigkeiten und anschließende Division mit der Gesamtanzahl aller Überprüfungen wird eine relative Benetzungsgröße erschaffen.

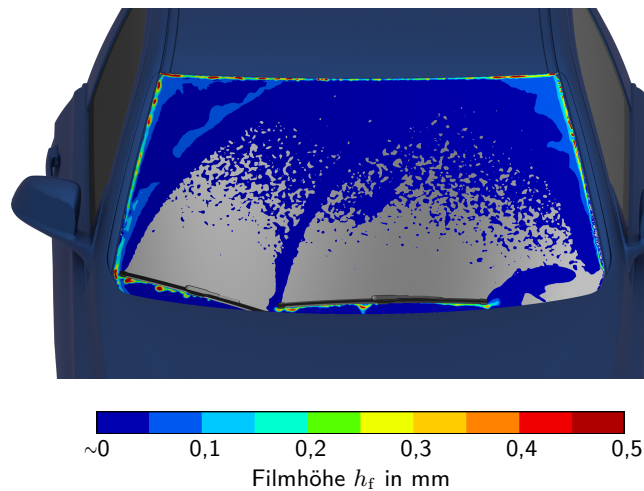


Abbildung 7.5: Wasserfilm auf der Frontscheibe für die Simulationemethodik bei bewegten Scheibenwischern und einer Anströmgeschwindigkeit von 120 km h^{-1}

Abbildung 7.6 zeigt die Gegenüberstellung der Benetzungshäufigkeit auf der Seitenscheibe für den klassischen Sichtfreihaltungsversuch im UWK und die numerische Simulation. Bei der hohen Anströmgeschwindigkeit von 120 km h^{-1} überwiegt die Benetzung in Form eines nahe der oberen Fensterführung verlaufenden Rinnsals (① in Abbildung 7.6). Die Einnahme dieses Wasserpfads lässt sich anhand der Wandschubspannung und der Stromlinien auf der Seitenscheibe erklären. Unterhalb der oberen Fensterführung befindet sich ein Bereich mit hohen, durch den A-Säulenwirbel verursachten Reibungsbeiwerten, dargestellt in rot in Abbildung 7.4. Die Stromlinien in diesem Bereich sind in positive z -Koordinatenrichtung orientiert, d. h. sobald Wasser in diese Region abfließt, wird es durch die ausgeprägten Schubkräfte entgegen der Schwerkraft nach oben gedrückt. Bei ausreichend hoher Geschwindigkeit der Luftanströmung ist das Wasser in dem Bereich zwischen Fensterführung und hohen Wandschubspannungen gefangen und kann diesen erst am stromabwärts liegenden Scheibenrand verlassen. Dieses Phänomen wird von der Simulation wiedergegeben. Die im Experiment in blau dargestell-

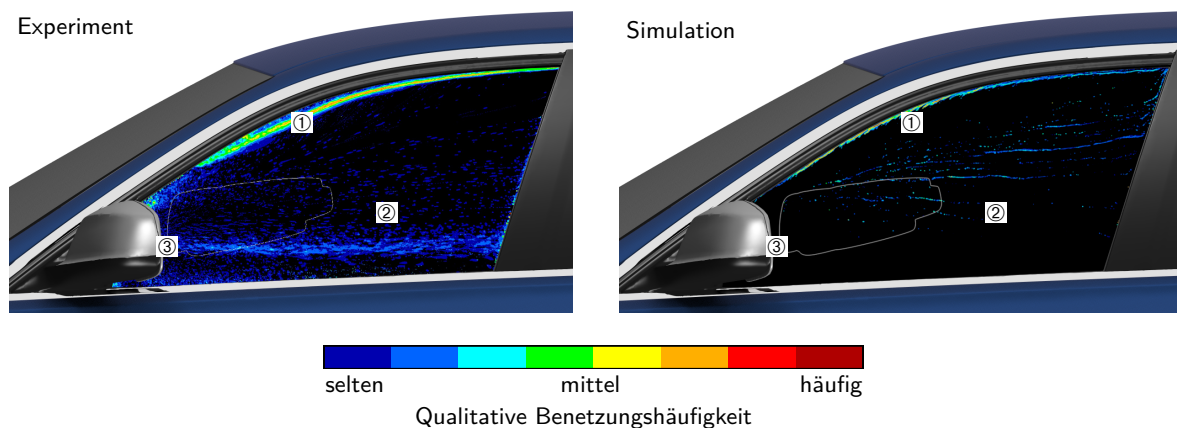


Abbildung 7.6: Benetzungshäufigkeit auf der Seitenscheibe beim klassischen Beregnungsversuch im UWK (links) und in der numerischen Simulation (rechts) für die detaillierte A-Säulenkontur unter Luftanströmung mit 120 km h^{-1}

ten Wasserpfade auf der Seitenscheibe (② in Abbildung 7.6) werden in der Simulation nur vereinzelt dargestellt. Mögliche Gründe dafür sind die Überschätzung der aerodynamischen Kräfte, wodurch die Flüssigkeitsphase stärker durch die umliegende Luftströmung beeinflusst wird (vgl. Abschnitt 6.4.3), und die benötigte Zeit bis zu der Entwicklung der Wasserpfade in der unteren Scheibenhälfte. Während der Messung fließt eine gewisse Wassermenge entlang der Zierleiste und der Fensterführung durch Gravitation herab und bildet mit der Zeit eine Wasserblase am Spiegeldreieck (③ in Abbildung 7.6). Ein Teil des dort angesammelten Wassers wird periodisch von der umliegenden Strömung mitgerissen und verläuft in Form von Tropfen und Rinnsalfragmenten über die Seitenscheibe, die im Experiment durch blau eingefärbte Wasserpfade in der unteren Hälfte der Seitenscheibe sichtbar sind. Weitere Gründe für die eher geringe Benetzungshäufigkeit in der Simulation sind, dass zum einen die Benetzung unterhalb der gesetzten Schwelle liegt und zum anderen die Flüssigkeit nicht durch die wand nächsten Zellen fließt und damit in der Auswertung unberücksichtigt bleibt. Bedingt durch die kurze physikalische Zeitspanne in der Simulation und die Unterschiede in der Auswertung wirkt die Seitenscheibe in der Simulation im Allgemeinen weniger stark benetzt.

7.4 Untersuchung von unterschiedlichen A-Säulenvarianten mit der Simulationsmethodik

Die beschriebene Simulationsmethodik wird in diesem Abschnitt auf unterschiedliche A-Säulengeometrien angewandt. Die erste A-Säulenvariante entspricht der detaillierten A-Säule, wie sie in Abschnitt 5.1.1 zur Grenzschichtuntersuchung auf der Seitenscheibe verwendet wurde. Die zweite A-Säulenvariante besitzt eine fiktive, glatte Kontur, bei der alle Rinnen verschlossen sind und der Übergang zur Seitenscheibe stufenlos verläuft. Die beiden Simulationen sind bei einer Anströmgeschwindigkeit von 120 km h^{-1} berechnet, hinsichtlich des Aufbaus sowie der Anfangs- und Randbedingungen gleich und unterscheiden sich lediglich in der Ausgestaltung der A-Säule.

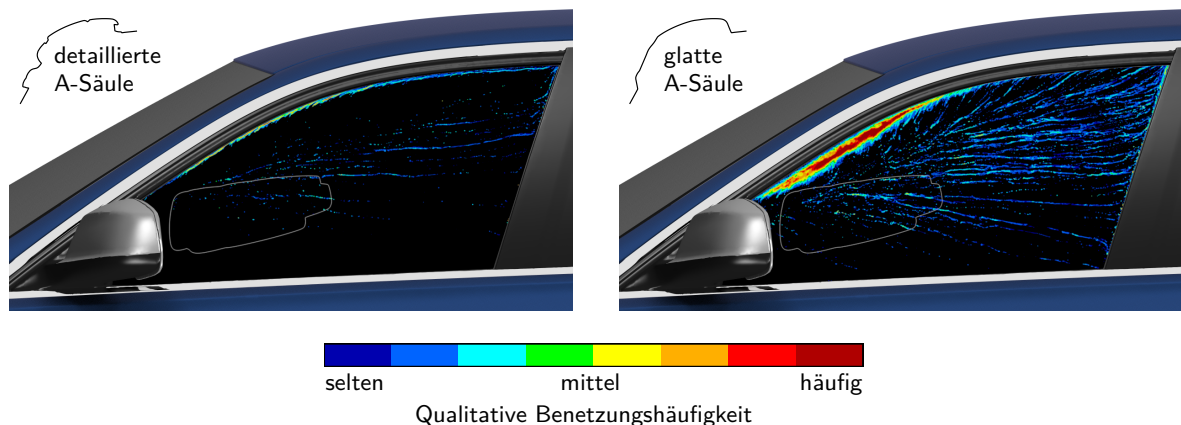


Abbildung 7.7: Benetzungshäufigkeit auf der Seitenscheibe für zwei verschiedene A-Säulengeometrien bei einer Luftanströmung mit 120 km h^{-1} (links: detaillierte A-Säulenkontur, rechts: glatte A-Säulenkontur)

Die Seitenscheibenbenetzungshäufigkeit nach der Berechnung von vier kompletten Scheibenwischerzyklen ist für beide A-Säulenvarianten in Abbildung 7.7 gegenübergestellt. Das von den Scheibenwischern auf der Frontscheibe aufgesammelte Wasser wird periodisch zur A-Säule geschoben und tritt stellenweise über. Bei der detaillierten A-Säulenvariante (links in Abbildung 7.7) wird die Seitenscheibe hauptsächlich direkt unterhalb der oberen Fensterführung benetzt. Das Wasser ist im Bereich zwischen Fensterführung und den Bereichen mit hohen Wandschubspannungen gefangen und wird durch den A-Säulenwirbel stromabwärts getragen. Darüber hinaus verlaufen einzelne Tropfen über die Seitenscheibe. Im Fall der glatten A-Säulenkontur (rechts in Abbildung 7.7) wird die Seitenscheibe großflächiger mit Flüssigkeit benetzt. Das über die A-Säule tretende Wasser fließt zunächst in Richtung Scheibenmitte, ehe es durch die angreifenden Luftkräfte umgelenkt und stromabwärts getragen wird. Da in diesem Fall die Stufe zur Fensterführung fehlt, kann das Wasser wieder zurück auf die A-Säulenoberfläche gelangen. Im hinteren Bereich verlässt die Flüssigkeit die Seitenscheibe im Gegensatz zur detaillierten A-Säulenvariante, bei der eine geometrischer Absatz dies verhindert. Bei der glatten A-Säulenkontur verläuft ein geringer Anteil der über die A-Säule beförderten Wassermenge in Form von Rinnsalfragmenten und Tropfen über die Seitenscheibe. Dies spricht dafür, dass die Scheibe in einem vergleichbaren Experiment stärker benetzt wird als bei der detaillierten A-Säulengeometrie. Die in der Simulation abgebildete Änderung des Benetzungsverhaltens durch Variation der A-Säulengeometrie ist insgesamt plausibel. Gemäß der hier gezeigten Untersuchungen ist die Simulationsmethodik für grundlegende Deltabetrachtungen mit verschiedenen Geometrien geeignet.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Sichtfreihaltung von Scheiben und Sensoren ist ein kundenrelevantes Ziel der Fahrzeugentwicklung, das sowohl den Komfort als auch die Sicherheit beeinflusst. Als Anbieter von Fahrzeugen im Premiumsegment stellt BMW hohe Anforderungen an sich selbst zur Erzielung bestmöglicher Fahrerlebnisse bei gleichzeitiger Erfüllung der Ansprüche an Sicherheit, Nachhaltigkeit und Design. Im Zuge zunehmend verkürzter Entwicklungszyklen wird daher eine frühzeitige Berücksichtigung des externen Wassermanagements mithilfe von numerischen Simulationen angestrebt, um Kosten einzusparen und Änderungen schneller und einfacher einzusteuern. Dadurch kann der Bedarf an teuren, physischen Prototypen minimiert werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist, eine Simulationsmethodik zur Abschätzung der Sichtfreihaltung in einer frühen Phase des Fahrzeugentstehungsprozesses zu entwickeln und zu validieren. Basierend auf der Literaturrecherche zu experimentellen und numerischen Studien zur Sichtfreihaltung an Fahrzeugen in Kapitel 2 wird festgestellt, dass eine Vielzahl an experimentellen Methodiken zur Auslegung und Bewertung der Scheibenbenetzung existiert (Abschnitt 2.1) und es an qualitativ und quantitativ validierten Simulationen zur gesamtheitlichen Betrachtung mangelt. Dahingegen werden einzelne Teilphänomene des externen Wassermanagements mittlerweile bereits erfolgreich simuliert (Abschnitt 2.2). Theoretische Grundlagen zu aerodynamischen Beiwerten, relevanten Kenngrößen der Mehrphasenströmung und Begrifflichkeiten zur Benetzung (Abschnitt 3.2 bis Abschnitt 3.4) sowie der allgemeine Wasserpfad entlang des Fahrzeugextérieurs bei einer Regenfahrt (Abschnitt 3.5) und eine Einführung zur Seitenscheibenbenetzung (Abschnitt 3.6) werden in Kapitel 3 beschrieben.

In Kapitel 4 werden die genutzten Entwicklungswerkzeuge inklusive ausgewählter Messverfahren und Modelle vorgestellt. Das sind auf der experimentellen Seite der aerodynamische Windkanal AEROLAB (Abschnitt 4.1.1) und der Umweltwindkanal (Abschnitt 4.1.2), in dem verschiedene Umwelteinflüsse nachgestellt und untersucht werden können, und auf der simulativen Seite die numerischen Mehrphasenmodelle (Abschnitt 4.4). Zu den numerischen Modellen zählen die Lagrange-Partikel (Abschnitt 4.4.1), das Fluidfilmmodell (Abschnitt 4.4.2), die Volume-of-Fluid-Methode (Abschnitt 4.4.3) und das hybride Mehrphasenmodell (Abschnitt 4.4.4). Zudem werden in Abschnitt 4.5 Ansätze zur Darstellung von Netzbewegungen, die zur Abbildung der Scheibenwischerbewegung in der Simulation benötigt werden, und in Abschnitt 4.6 ein Überblick zu den Rechenzeiten der verschiedenen Simulationsfälle in dieser Arbeit aufgezeigt.

Kapitel 5 behandelt Voruntersuchungen zur Scheibenwischermethodik. Die Strömungsverhältnisse nahe der A-Säule und auf der Seitenscheibe werden in Abschnitt 5.1 mithilfe von Windkanalmessungen mit Hitzdrahtanemometrie und aufgeklebten Fädchen charakterisiert.

Der Abgleich der gemessenen Grenzschichtprofile auf der Seitenscheibe und der Strömungsrichtung mit der Strömungssimulation zeigt eine hervorragende Übereinstimmung. Eine Erkenntnis dabei ist, dass zur Erzielung exakter Grenzschichtprofile ein hoher Detaillierungsgrad der Geometrie benötigt wird, insbesondere wenn – wie hier – der Fokus auf einem sehr kleinen Bereich innerhalb der großen Simulationsdomain liegt.

Zur Validierung und zum Benchmark des Fluidfilmmodells werden Grundlagenversuche im wasserfesten, vertikalen Windkanal der TU Darmstadt mit Simulationen verglichen (Abschnitt 5.2). Der Vergleich erfolgt anhand von Benetzungsmustern und grafisch bestimmten Kenngrößen der Benetzung. Die Streubreite der Experimente ist in der Regel höher als in der Simulation. Um die Streuung in den Benetzungsmustern der Simulation zu erhöhen, wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem auf einer Oberfläche eine zufällige Kontaktwinkelverteilung in einem vorgegebenen Schwankungsbereich erzeugt und als Randbedingung in der Simulation gesetzt wird. Ferner wird durch Anwendung dieses Verfahrens der in der Literatur zum Filmmodell genannte Effekt eines verzögerten Filmaufbruchs reduziert. Die Simulationsergebnisse liegen für sämtliche Untersuchungen bei unterschiedlichen Luftanströmgeschwindigkeiten und Wasservolumenströmen innerhalb der Streuung der mehrfach durchgeführten Experimente. Das Benetzungsmuster sowie die charakteristische Kenngrößen werden vom Filmmodell ausreichend genau vorhergesagt.

Durch Parameterstudien an einem reduzierten, simulativen Testfall (Abschnitt 5.3) können verschiedene Einflussfaktoren schneller als in einer Simulation am gesamten Fahrzeug untersucht und Erkenntnisse für die finale Scheibenwischermethodik gewonnen werden. Hierbei wird einerseits überprüft, ob eine Veränderung die erwartete Reaktion hervorruft, und andererseits werden Einstellungsparameter bestimmt. Gleichzeitig wird Erfahrung zum Simulationsaufbau und der Kopplung der verschiedenen Modelle gesammelt. Beim Übergang zur Mehrphasensimulation mit Scheibenwischerbewegung wird die Simulationsdomain aufgrund des enormen Berechnungsaufwands auf den nötigsten Bereich reduziert. In einem Zwischenschritt werden die Strömungsverhältnisse am gesamten Fahrzeug mit denen von drei verschiedenen Ausschnittsimulationen gegenübergestellt (Abschnitt 5.4), wobei die Strömungsfeldgrößen der Gesamtfahrzeugsimulation als Anfangs- und Randbedingungen für die jeweilige Ausschnittsimulation dienen. Die Ausschnittsimulationen unterscheiden sich ausschließlich in der Art der Vernetzung und der Wandbehandlung. Der Vergleich von Druckverläufen auf der Fahrzeugoberfläche und Geschwindigkeitsfelder in verschiedenen Schnittebenen zeigt eine hohe Übereinstimmung. Die notwendige Verkleinerung der Simulationsdomain ist damit bei ausreichender Genauigkeit der berechneten Strömungsverhältnisse im Ausschnitt möglich.

Die realistische Abbildung der Scheibenwischerbewegung ist ein zentraler Punkt bei der Simulation der Sichtfreihaltung. In Kapitel 6 werden die dazu notwendigen Schritte beim Aufbau der Mehrphasensimulation mit bewegten Scheibenwischern (Abschnitt 6.2) aufgeführt und das Validierungsexperiment mit Wasseraustrittskörper auf der Fahrzeugdachkante (Abschnitt 6.1) wird vorgestellt. Das Validierungsexperiment liefert definierte und in die Simulation übertragbare Randbedingungen. In einer aerodynamischen Betrachtung der Scheibenwischersimulation wird die lokale und die globale Strömungsbeeinflussung durch die bewegten Scheibenwischer ersichtlich (Abschnitt 6.3). Der Verlauf des Widerstands- und Auftriebskoeffizienten der Scheibenwischer über einen kompletten Zyklus offenbart zwei Maxima, wobei das Maximum der

Abwärtsbewegung aufgrund der höheren Relativgeschwindigkeit zwischen Luftströmung und Scheibenwischerbewegung höher ist. Gleichzeitig kann mit der Simulation bestimmt werden, ob ein Abheben der Wischer von der Scheibe wahrscheinlich ist. Der geringe Anstieg des Fahrzeugwiderstandsbeiwerts bei bewegten Scheibenwischern in der Simulation konnte mit Windkanalmessungen bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten nachgewiesen und validiert werden.

Nachdem gezeigt wurde, dass die rein aerodynamische Simulation zur Scheibenwischerbewegung plausible Werte liefert, wird die mehrphasige Scheibenwischersimulation in Abschnitt 6.4 validiert. Zur Validierung werden Benetzungsmuster auf der Front- und der Seitenscheibe sowie quantitative Größen bei verschiedenen Luftanströmgeschwindigkeiten und A-Säulenkonzepten herangezogen. Die Benetzungsmuster weisen eine hohe Übereinstimmung auf und zeigen identische Benetzungsphänomene:

- Rinnsale im vom Scheibenwischer überfahrenen Bereich der Frontscheibe,
- flächiger Film auf der Beifahrerseite mit Bildung von Oberflächenwellen,
- Filmaufdickung am Scheibenwischeraußenkreis,
- Ablenkung der Benetzung durch die Luftanströmung und
- vergleichbare Seitenscheibenbenetzung je nach A-Säulenkonzept.

Als quantitative Größen werden der prozentuale Wasseranteil, der über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste abfließt, und die mittlere Rinnsalfließgeschwindigkeit ausgewertet. Durch Schließen der Wasserfangleiste nimmt die über die A-Säule beförderte Wassermenge zu. Auch bei Erhöhung der Luftanströmgeschwindigkeit ist ein Anstieg der über die A-Säule beförderten Wassermenge zu beobachten. Die mit offenen, aktiven Konturen bestimmte, mittlere Rinnsalfließgeschwindigkeit auf der Frontscheibe steigt bei Erhöhung des zugeführten Wassermassenstroms und sinkt mit zunehmender Luftanströmgeschwindigkeit, die entgegen der Rinnsalfließrichtung wirkt. Für alle untersuchten Varianten werden die Tendenzen von der Simulation korrekt vorhergesagt. Die Simulationsergebnisse liegen dabei stets innerhalb der Streubreite der mehrfach durchgeführten Experimente. Darüber hinaus wird der Einfluss eines geänderten Kontaktwinkels auf die Rinnsalfließgeschwindigkeit simulativ analysiert. Der Übergang von einem konstanten Kontaktwinkel zu einem Kontaktwinkelteppich, wie er bei den Grundlagenversuchen zum Filmmodell empfohlen wird, ändert die mittlere Fließgeschwindigkeit nicht. Mit Erhöhung des Kontaktwinkels steigt hingegen die mittlere Fließgeschwindigkeit und die Streuung der einzelnen Rinnsalfließgeschwindigkeiten in der Simulation.

Um den klassischen Sichtfreihaltungsversuch im UWK nachzusimulieren, ist die Kenntnis des Wassereintrags auf der Fahrzeugoberfläche erforderlich. Der Wassereintrag wird durch Lagrange-Simulationen mit Zweivegekopplung bestimmt (Abschnitt 7.1). Dazu werden die Partikelbahnen von den Sprühdüsen bis zum Fahrzeug berechnet. Die Einschnürung des Sprühkegels in Abhängigkeit der Luftgeschwindigkeit wird dabei korrekt abgebildet, was ein Vergleich mit aus der Literatur bekannten, effektiven Sprühkegeln verdeutlicht. Zur Überprüfung der auf der Fahrzeugoberfläche auftreffenden Wassermenge und -verteilung wurden Validierungsexperimente konzipiert und dokumentiert. Die ausstehende Durchführung und Auswertung könnte die Unsicherheit in der eingebrachten Wassermenge und -verteilung beseitigen. Der finale Prozess zur Simulation des klassischen Sichtfreihaltungsversuchs gliedert sich

in drei Teile (siehe Abbildung 7.1). Eine detaillierte Strömungssimulation und eine Lagrange-Partikel-Simulation am gesamten Fahrzeug dienen als Anfangs- und Randbedingungen für die Mehrphasensimulation am Fahrzeugausschnitt.

Da aufgrund der Komplexität einer solchen Simulation nicht so lange wie gewünscht gerechnet werden kann, ist eine der größten Herausforderungen die unterschiedlich lange, physikalische Zeitspanne von Experiment und Simulation. Nichtsdestotrotz können mithilfe des entwickelten, mehrstufigen Methodik ähnliche Benetzungsphänomene wie im Versuch aufgezeigt werden (Abschnitt 7.3). Der Vergleich der Benetzungsmuster zeigt, dass der mengenmäßig größte Anteil korrekt dargestellt wird. Allerdings werden auch Verbesserungspotentiale aufgedeckt. So wird die sich im Versuch bildende Wasserblase hinter dem Spiegeldreieck in der Simulation nicht abgebildet. Mögliche Gründe sind die dafür benötigte Zeit und die Überschätzung der aerodynamischen Kräfte auf die Flüssigkeitsphase, die anhand des Wasserübertritts auf der A-Säule in Abschnitt 6.4.3 untersucht wurde. Weiterhin wird eine Simulation mit glatter A-Säulengeometrie durchgeführt (Abschnitt 7.4). Die durch die Variation der A-Säule hervorgerufene Änderung der Seitenscheibenbenetzung entspricht hierbei den Erwartungen. Gemäß den in dieser Arbeit gezeigten Untersuchungen ist die entwickelte Methodik zur Abschätzung der Sichtfreihaltung und zur Deltabetrachtung geeignet.

Die Sichtfreihaltung wurde in der vorliegenden Arbeit gesamtheitlich untersucht. Durch gesamtheitliche Betrachtung werden Unsicherheiten bei der Wahl der Randbedingungen von Teiluntersuchungen vermieden. Allerdings wird die Simulation dadurch schnell sehr komplex und rechenzeitintensiv. Durch Implementierung einer adaptiven Netzverfeinerung eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Reduktion der Rechenzeit, da in diesem Fall nur die relevanten Bereiche automatisiert verfeinert werden und der Rest gröber aufgelöst bleibt. In der neusten Version von STAR-CCM+ ist dieses Verfahren zwar vorhanden, jedoch kann es bisher nicht in Kombination mit dem Fluidfilmmodell verwendet werden. Neben der Erweiterung der adaptiven Netzverfeinerung für das hybride Mehrphasenmodell ist eine Erhöhung der Stabilität für einen breiten Bereich von Netzauflösungen erwünscht, sodass weniger Nutzerexpertise benötigt wird, um eine stabile Lösung zu erhalten.

Abgesehen von der Weiterentwicklung der Volume-of-Fluid-Methode und des Fluidfilmmodells sollte die Erweiterung der Smoothed Particle Hydrodynamics verfolgt werden. SPH ist ein effizientes Lösungsverfahren, mit dem längere, physikalische Zeiten in akzeptabler Zeit berechnet werden können. Hierbei sind insbesondere zwei Verbesserungspotentiale in Bezug zum EWM zu nennen. Das ist zum einen die Kopplung des SPH-Lösers mit einem Strömungslöser für die Luftphase, wodurch die wechselseitige Interaktion zwischen Wasser- und Luftphase ermöglicht wird, und zum anderen die Implementierung von Mehrphaseninteraktionsmodellen zur Vorgabe von Kontaktwinkeln anstelle von Adhäsions- und Kohäsionsfaktoren. Die Smoothed Particle Hydrodynamics könnte deutliche Rechenzeitvorteile bieten. Darüber hinaus ist ein paralleler Einsatz von schnelleren, gegebenenfalls nicht so genauen Verfahren zur Vorauswahl einer Variante und einer anschließenden Überprüfung der Auswahl mithilfe eines aufwendigeren Verfahrens denkbar.

Literaturverzeichnis

- [1] **Ade, M.:** „Development of a Numerical Methodology for Water Management Simulations of Passenger Cars“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2019. URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8813>.
- [2] **Aguinaga, S.; Bouchet, J.-P.:** „Quantitative Assessment by UV Fluorescence of Rain Water Flow on Vehicle Body in the Jules Verne Climatic Wind Tunnel“. In: *Progress in Vehicle Aerodynamics and Thermal Management*. Hrsg. von **Wiedemann, J.** Renningen: Expert-Verlag, 2009, S. 127–142. ISBN: 978-3-8169-2944-4.
- [3] **Alam, F.** et al.: „The flow characteristics around a car A-pillar“. In: *13th Australasian Fluid Mechanics Conference* (1998).
- [4] **AlSibai, F.:** „Experimentelle Untersuchung der Strömungscharakteristik und des Wärmeübergangs bei welligen Rieselfilmen“. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 2005.
- [5] **Ashton, M.; Baas, P.:** *Spray and Wind Buffeting from Heavy Vehicles: A Literature Review*. Wellington, New Zealand, 1998.
- [6] **Ausner, I.:** „Experimentelle Untersuchungen mehrphasiger Filmströmungen“. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 2006. DOI: 10.14279/depositonce-1479. URL: <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/1776>.
- [7] **Auto Bild:** „Scheibenversiegelungen im Test. Ab in die Tonne“. In: *Auto Bild* 50 (2003), S. 40–43.
- [8] **Bai, C. X.; Rusche, H.; Gosman, A. D.:** „Modeling of Gasoline Spray Impingement“. In: *Atomization and Sprays* 12.1-3 (2002), S. 1–28. ISSN: 1045-5110. DOI: 10.1615/AtomizSpr.v12.i123.10.
- [9] **Bai, C.:** „Modelling of Spray Impingement Processes“. Dissertation. London: Imperial College, 1996.
- [10] **Bai, C.; Gosman, A. D.:** „Mathematical Modelling of Wall Films Formed by Impinging Sprays“. In: *SAE Technical Paper Series* (1996). DOI: 10.4271/960626.
- [11] **Bannister, M.:** „Drag and Dirt Deposition Mechanisms of External Rear View Mirrors and Techniques Used for Optimisation“. In: *SAE Technical Paper Series* (2000). DOI: 10.4271/2000-01-0486.
- [12] **BASF:** *Tinopal SFP. Technical Data Sheet*. Ludwigshafen am Rhein, 2010.
- [13] **Basset, A. B.:** „On the Motion of a Sphere in a Viscous Liquid“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (1888), S. 43–63.

- [14] **Beer, A.:** „Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten“. In: *Annalen der Physik und Chemie* (1852), S. 78–88. DOI: 10.1002/andp.18521620505.
- [15] **Berkooz, G.; Holmes, P.; Lumley, J. L.:** „The Proper Orthogonal Decomposition in the Analysis of Turbulent Flows“. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 25.1 (1993), S. 539–575. DOI: 10.1146/annurev.fl.25.010193.002543.
- [16] **Berry, M. V.:** „The molecular mechanism of surface tension“. In: *Physics Education* 6.2 (1971), S. 79–84. DOI: 10.1088/0031-9120/6/2/001.
- [17] **Blocken, B.; Carmeliet, J.:** „A review of wind-driven rain research in building science“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92.13 (2004), S. 1079–1130. ISSN: 01676105. DOI: 10.1016/j.jweia.2004.06.003.
- [18] **BMW Group:** *BMW Technologietag 2009. EfficientDynamics. Medieninformation.* München, 2009. URL: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0022773DE/bmw-technologietag-2009-efficientdynamics?language=de> (abgerufen am 10.11.2019).
- [19] **BMW Group:** *Das Energie- und umwelttechnische Versuchszentrum der BMW Group. Medieninformation.* München, 2010. URL: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0080599DE/das-energie-und-umwelttechnische-versuchszentrum-der-bmw-group> (abgerufen am 10.11.2019).
- [20] **BMW Group:** *Aerodynamic Test Center.* München, 2011.
- [21] **Borg, A.; Vevang, R.:** „On the Prediction of Exterior Contamination with Numerical Simulations. Simple Lagrangian Particle Tracking methods with and without Wall Film Model“. In: 6th MIRA International Conference on Vehicle Aerodynamics. Gaydon, England, 2006.
- [22] **Bouchet, J. P.; Delpech, P.; Palier, P.:** „Wind tunnel simulation of road vehicle in driving rain of variable intensity“. In: *5th International Vehicle Aerodynamics Conference* (2004).
- [23] **Boussinesq, J. V.:** „Sur la resistance d’une sphere solide“. In: *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l’Académie des sciences* 100 (1885), S. 935–937.
- [24] **Brackbill, J.; Kothe, D.; Zemach, C.:** „A Continuum Method for Modeling Surface Tension“. In: *Journal of Computational Physics* 100.2 (1992), S. 335–354. DOI: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y.
- [25] **Braess, H.-H.; Seiffert, U., Hrsg.:** *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik.* 7., aktualisierte Auflage. ATZ / MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-658-01691-3. DOI: 10.1007/978-3-658-01691-3.
- [26] **Brauer, H.:** *Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen.* Aarau: Sauerländer, 1971.
- [27] **Brauner, N.; Maron, D. M.:** „Characteristics of inclined thin films, waviness and the associated mass transfer“. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 25.1 (1982), S. 99–110. ISSN: 00179310. DOI: 10.1016/0017-9310(82)90238-1.

- [28] **Buckingham, E.:** „On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations“. In: *Physical Review* 4.4 (1914), S. 345–376. ISSN: 0031-899X. DOI: 10.1103/PhysRev.4.345.
- [29] **Çadırcı, S.; Ak, S. E.; Şelenbaş, B.; Güneş, H.:** „Improving Aerodynamic Performance for a Reliable Wiper System“. In: *International Journal of Automotive Engineering and Technologies* 6.1 (2017), S. 30–40. ISSN: 2146-9067. DOI: 10.18245/ijaet.308418.
- [30] **Campos, F.; Mendonca, F.; Weston, S.; Islam, M.:** „Vehicle Soiling Simulation“. In: 6th MIRA International Conference on Vehicle Aerodynamics. Gaydon, England, 2006.
- [31] **Cerdá, A.:** „Rainfall drop size distribution in the Western Mediterranean basin, València, Spain“. In: *CATENA* 30.2-3 (1997), S. 169–182. ISSN: 03418162. DOI: 10.1016/S0341-8162(97)00019-2.
- [32] **Chan-Mou, T.:** *Mean Value and Correlation Problems connected with the Motion of Small Particles suspended in a Turbulent Fluid*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1947. ISBN: 9789401761017. DOI: 10.1007/978-94-017-6101-7.
- [33] **Dasarathan, D.; Jilesen, J.; Croteau, D.; Ayala, R.:** „CFD Water Management Design for a Passenger Coach with Correlation“. In: *SAE Technical Paper Series* 2016-01-8155 (2016). DOI: 10.4271/2016-01-8155.
- [34] **Day, P.; Manz, A.; Zhang, Y., Hrsg.:** *Microdroplet Technology. Principles and Emerging Applications in Biology and Chemistry*. Integrated Analytical Systems. New York, NY: Springer, 2012. ISBN: 978-1-4614-3265-4. DOI: 10.1007/978-1-4614-3265-4.
- [35] **Demel, D.:** „CFD-Validierung von Pkw-Vollheckfahrzeugen“. Masterarbeit. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2017.
- [36] **Demel, D.:** „Sichtfreihaltung. Ein numerisches Werkzeug für frühe Entwicklungsphasen“. In: BMW ProMotion Dialogtag. München, 2019.
- [37] **Demel, D.; Feldmann, J.; Schütz, T.; Tropea, C.:** „Simulating Rain Water Guidance for a Better View“. In: *ATZ Worldwide* 121.12 (2019), S. 50–53. ISSN: 2192-9076. DOI: 10.1007/s38311-019-0141-0.
- [38] **Demel, D.; Feldmann, J.; Schütz, T.; Tropea, C.:** „Simulation der Regenwasserführung für eine bessere Sicht“. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 121.12 (2019), S. 52–55. ISSN: 2192-8800. DOI: 10.1007/s35148-019-0144-6.
- [39] **Demel, D.; Kistorz, P.; Schütz, T.; Grundmann, S.:** „Einfluss der Scheibenwischerbewegung auf die instationäre Fahrzeugumströmung“. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 122.10 (2020), S. 54–59. ISSN: 2192-8800. DOI: 10.1007/s35148-020-0316-4.
- [40] **Demel, D.; Kistorz, P.; Schütz, T.; Grundmann, S.:** „Influence of Windshield Wiper Movement on Vehicle Aerodynamics“. In: *ATZ Worldwide* 122.10 (2020), S. 54–59. ISSN: 2192-9076. DOI: 10.1007/s38311-020-0289-7.
- [41] **Demel, D.; Schütz, T.; Kölzer, C.; Tropea, C.:** „Anwendungen für Mehrphasen-CFD am Fahrzeugexterieur“. In: *Forschung im Ingenieurwesen* (2021). DOI: 10.1007/s10010-021-00480-z.

- [42] **Demel, D.; Schütz, T.; Tropea, C.; Hussong, J.:** „Validierung einer Methode zur Abbildung der Frontscheibenbenetzung eines Personenkraftwagens unter Einfluss der Scheibenwischerbewegung“. In: *Haus der Technik: Fahrzeug-Aerodynamik*. München, 2021.
- [43] **Demel, D.; Schütz, T.; Tropea, C.; Hussong, J.:** *Validierung einer Methode zur Abbildung der Frontscheibenbenetzung eines Personenkraftwagens unter Einfluss der Scheibenwischerbewegung*. Hrsg. von **Haus der Technik e.V.** München, 2021.
- [44] **Dianat, M.; Skarysz, M.; Garmory, A.:** „A Coupled Level Set and Volume of Fluid Method for Automotive Exterior Water Management Applications“. In: *International Journal of Multiphase Flow* 91 (2017), S. 19–38. ISSN: 03019322. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.01.008.
- [45] **Dobrzynski, W.; Soja, H.:** „Effect on Passenger Car Wind Noise Sources of Different A-Post Configurations“. In: *Inter-Noise Conference 94* (1994), S. 387–390.
- [46] **Duggirala, R. K.; Gopalpur, S.; Jehle-Graf, E.:** „Simulation of Wiper Movement - Its impact on Wiper Aerodynamics and Wiping Performance“. In: *STAR Global Conference*. Prag, Tschechische Republik, 2016.
- [47] **Eötvös, R.:** „Über den Zusammenhang der Oberflächenspannung der Flüssigkeiten mit ihrem Molecularvolumen“. In: *Annalen der Physik und Chemie* 263.3 (1886), S. 448–459. DOI: 10.1002/andp.18862630309.
- [48] **Erpul, G.; Gabriels, D.; Janssens, D.:** „Assessing the Drop Size Distribution of Simulated Rainfall in a Wind Tunnel“. In: *Soil and Tillage Research* 45.3-4 (1998), S. 455–463. ISSN: 01671987. DOI: 10.1016/S0933-3630(97)00030-5.
- [49] **Feldmann, J.:** „Aerodynamically Driven Surface-bound Liquid Flows: Characterization and Modeling of Wetting Patterns“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2020. URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/11443>.
- [50] **Ferziger, J. H.; Peric, M.; Street, R. L.:** *Numerische Strömungsmechanik*. 2. aktualisierte Auflage. 2020. ISBN: 978-3-662-46543-1.
- [51] **Foucart, H.; Blain, E.:** „Water-flow Simulation on Vehicle Panels by Taking into Account the Calculated Aerodynamic Field“. In: *SAE Technical Paper Series* (2005). DOI: 10.4271/2005-01-3572.
- [52] **Freymann, R.; Kerschbaum, H.:** „Aerodynamikentwicklung am Beispiel der neuen 5er-Baureihe von BMW“. In: *Sonderdruck der ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 98 (1996).
- [53] **Fröhlich, J.:** „Numerische Modellierung von Mehrphasenströmungen“. Skript. Dresden: Technische Universität Dresden, 2019.
- [54] **Gaylard, A. P.; Kirwan, K.; Lockerby, D. A.:** „Surface Contamination of Cars. A Review“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 231.9 (2017), S. 1160–1176. ISSN: 0954-4070. DOI: 10.1177/0954407017695141.

- [55] **Gaylard, A. P.** et al.: „Modelling A-Pillar Water Overflow. Developing CFD and Experimental Methods“. In: *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* 5.2 (2012), S. 789–800. ISSN: 1946-4002. DOI: 10.4271/2012-01-0588.
- [56] **Gaylard, A. P.; Duncan, B.:** „Simulation of Rear Glass and Body Side Vehicle Soiling by Road Sprays“. In: *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* 4.1 (2011), S. 184–196. ISSN: 1946-4002. DOI: 10.4271/2011-01-0173.
- [57] **Gennes, P.-G. d.; Brochard-Wyart, F.; Quéré, D.:** *Capillarity and Wetting Phenomena. Drops, Bubbles, Pearls, Waves*. New York, NY: Springer, 2003. ISBN: 9780387005928.
- [58] **Ghani, S.; Aroussi, A.; Rice, E.:** „Simulation of road vehicle natural environment in a climatic wind tunnel“. In: *Simulation Practice and Theory* 8.6-7 (2001), S. 359–375. ISSN: 09284869. DOI: 10.1016/S0928-4869(00)00028-8.
- [59] **Ghezzehei, T. A.:** „Constraints for flow regimes on smooth fracture surfaces“. In: *Water Resources Research* 40 (2004). ISSN: 00431397. DOI: 10.1029/2004WR003164.
- [60] **Gingold, R. A.; Monaghan, J. J.:** „Smoothed particle hydrodynamics. Theory and application to non-spherical stars“. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 181.3 (1977), S. 375–389. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/181.3.375.
- [61] **Gosman, A. D.; Ioannides, E.:** „Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fueled Combustors“. In: *Journal of Energy* 7.6 (1983), S. 482–490. ISSN: 0146-0412. DOI: 10.2514/3.62687.
- [62] **Götz, H.:** „The Influence of Wind Tunnel Tests on Body Design, Ventilation, and Surface Deposits of Sedans and Sport Cars“. In: *SAE Technical Paper Series* 710212 (1971). DOI: 10.4271/710212.
- [63] **Gu, F.; Liu, C. J.; Yuan, X. G.; Yu, G. C.:** „CFD Simulation of Liquid Film Flow on Inclined Plates“. In: *Chemical Engineering & Technology* 27.10 (2004), S. 1099–1104. ISSN: 0930-7516. DOI: 10.1002/ceat.200402018.
- [64] **Hadžić, H.:** „Development and Application of Finite Volume Method for the Computation of Flows Around Moving Bodies on Unstructured, Overlapping Grids“. Dissertation. Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg. DOI: 10.15480/882.231. URL: <https://tore.tuhh.de/handle/11420/233>.
- [65] **Hagemeier, T.:** „Experimental and numerical investigation of vehicle soiling processes“. Dissertation. Magdeburg: Otto von Guericke Universität Magdeburg, 2012.
- [66] **Hagemeier, T.; Hartmann, M.; Thévenin, D.:** „Practice of vehicle soiling investigations. A review“. In: *International Journal of Multiphase Flow* 37.8 (2011), S. 860–875. ISSN: 03019322. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.05.002.
- [67] **Hänel, D.:** *Molekulare Gasdynamik. Einführung in die kinetische Theorie der Gase und Lattice-Boltzmann-Methoden*. Berlin: Springer-Verlag, 2004. ISBN: 978-3-540-35047-7. DOI: 10.1007/3-540-35047-0.
- [68] **Haruna, S.; Nouzawa, T.; Kamimoto, I.; Sato, H.:** „An Experimental Analysis and Estimation of Aerodynamic Noise Using a Production Vehicle“. In: *SAE Technical Paper* 900316 (1990). DOI: 10.4271/900316.

- [69] **Helling GmbH:** *UV-LED-Flächenleuchte ZERO 500/5. Datenblatt.* Heidgraben, 2016.
- [70] **Helling GmbH:** *Kombi UV-Intensitäts- und Luxmeter. Ein Gerät – Zwei Funktionen.* Heidgraben, 2018.
- [71] **Hennig, A.:** „Eine erweiterte Methode zur Korrektur von Interferenzeffekten in Freistrahlschwindkanälen für Automobile“. Dissertation. 2016. DOI: 10.1007/978-3-658-17827-7.
- [72] **Hennig, J.:** *Virtuelle Prototypen für Lamellenventile in Pkw-Kältemittelverdichtern.* Bd. 135. AutoUni - Schriftenreihe. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. ISBN: 978-3-658-24846-8. DOI: 10.1007/978-3-658-24846-8.
- [73] **Hirt, C. W.; Nichols, B. D.:** „Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries“. In: *Journal of Computational Physics* 39.1 (1981), S. 201–225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
- [74] **Höfer, P.; Mößner, A.:** „Schmutzfreihaltung“. In: *Hucho - Aerodynamik des Automobils.* Hrsg. von **Schütz, T.** ATZ / MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, S. 464–484. ISBN: 978-3834819192.
- [75] **Hoffmann, A.; Ausner, I.; Repke, J.-.; Wozny, G.:** „Detailed Investigation of Multiphase (Gas–Liquid and Gas–Liquid–Liquid) Flow Behaviour on Inclined Plates“. In: *Chemical Engineering Research and Design* 84.2 (2006), S. 147–154. ISSN: 02638762. DOI: 10.1205/cherd.05110.
- [76] **Howell, J.; Windsor, S.; Le Good, G.:** „A Novel Test Rig for the Aerodynamic Development of a Door Mirror“. In: *SAE Technical Paper* 2006-01-0340 (2006). DOI: 10.4271/2006-01-0340.
- [77] **Hucho, W.-H.:** *Aerodynamics of road vehicles. From fluid mechanics to vehicle engineering.* London: Butterworth-Heinemann, 1987. ISBN: 978-0750612678.
- [78] **JAI:** *BM-500 GE / BB-500 GE. Datenblatt.* Valby, Dänemark, 2015.
- [79] **Jehle-Graf, E.; Ade, M.; Feldic, M.; Duggirala, R.:** „Simulation of Wiper Movement on a Real Car. Steps towards Numerical Water Management Predictions“. In: Haus der Technik: Fahrzeug-Aerodynamik. München, 5.07.2016–06.07.2016.
- [80] **Jilesen, J.** et al.: „Advances in Modelling A-Pillar Water Overflow“. In: *SAE Technical Paper Series* (2015). DOI: 10.4271/2015-01-1549.
- [81] **Johnson, R. E.; Dettre, R. H.:** „Contact Angle Hysteresis. III. Study of an Idealized Heterogeneous Surface“. In: *The Journal of Physical Chemistry* 68.7 (1964), S. 1744–1750. DOI: 10.1021/j100789a012.
- [82] **Joo, S. W.; Davis, S. H.; Bankoff, S. G.:** „Two- and three-dimensional instabilities and rupture of thin liquid films falling on heated inclined plate“. In: *Nuclear Engineering and Design* 141.1-2 (1993), S. 225–236. ISSN: 00295493. DOI: 10.1016/0029-5493(93)90103-G.
- [83] **Jos. Schneider Optische Werke GmbH:** *Bandpass Filter BP 465-70 HT. Datenblatt.* Bad Kreuznach, 2017.

- [84] **Jungmann, J. M.:** „Eine experimentell validierte Methodik zur numerischen Simulation und Analyse des aerodynamischen und fahrdynamischen Verhaltens von Personenkraftwagen bei realitätsnaher, querdynamischer Fahrzeuganregung“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2020. URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/11646>.
- [85] **Kabanovs, A.; Garmory, A.; Passmore, M.; Gaylard, A.:** „Investigation into the dynamics of wheel spray released from a rotating tyre of a simplified vehicle model“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 184 (2019), S. 228–246. ISSN: 01676105. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.11.024.
- [86] **Karbon, K. J.; Longman, S. E.:** „Automobile Exterior Water Flow Analysis Using CFD and Wind Tunnel Visualization“. In: *SAE Technical Paper Series* 980035 (1998). DOI: 10.4271/980035.
- [87] **Kass, M.; Witkin, A.; Terzopoulos, D.:** „Snakes. Active contour models“. In: *International Journal of Computer Vision* 1.4 (1988), S. 321–331. ISSN: 0920-5691. DOI: 10.1007/BF00133570.
- [88] **Kistler, S. F.:** „Hydrodynamics of Wetting“. In: *Wettability*. Hrsg. von **Berg, J. C.** Surfactant Science Series. New York: Marcel Dekker, 1993, S. 311–430. ISBN: 0-8247-9046-4.
- [89] **Kopp, S.:** „The Aerodynamic Development of a Commercial Vehicle“. In: *7. Internationales Stuttgarter Symposium*. Hrsg. von **Bargende, M.; Reuss, H.-C.; Wiedemann, J.** Proceedings. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007, S. 295–311.
- [90] **Krüß GmbH:** *MobileDrop - GH11 Kontaktwinkelmessinstrument. Benutzerhandbuch V3-14*. Hamburg, 2014.
- [91] **Kutelova, Z. et al.:** „Glass Spheres: Functionalization, Surface Modification and Mechanical Properties“. In: *Surface Effects in Solid Mechanics*. Hrsg. von **Altenbach, H.; Morozov, N. F.** Advanced structured materials. Berlin: Springer-Verlag, 2013, S. 95–104. ISBN: 9783642357824. DOI: 10.1007/978-3-642-35783-1_8.
- [92] **Lacy, R. E.:** „Driving-Rain Maps and the Onslaught of Rain on Buildings“. In: RILEM/CIB Symposium on Moisture in Buildings. Helsinki, Finnland, 16.08.1965–19.08.1965.
- [93] **Lambert, J. H.:** *Photometria, sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*. Augsburg: Sumptibus Vidae Eberhardi Klett, 1760. URL: <https://docnum.unistra.fr/digital/collection/coll12/id/14505>.
- [94] **Landau, L. D.; Lifshitz, E. M.:** *Fluid Mechanics. Second Edition. Volume 6 of Course of Theoretical Physics*. 2. Aufl. Oxford: Pergamon Press, 1987. ISBN: 0-08-033933-6.
- [95] **Landwehr, T.:** *Neue Methoden zur Untersuchung der Sichtfreihaltung an Kraftfahrzeugen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. ISBN: 978-3-658-29415-1. DOI: 10.1007/978-3-658-29416-8.

- [96] **Landwehr, T.; Wiedemann, J.; Kuthada, T.; Widdecke, N.:** „Investigation of visibility properties through wetted glass planes on vehicles“. In: *16. Internationales Stuttgarter Symposium*. Hrsg. von **Bargende, M.; Reuss, H.-C.; Wiedemann, J.** Proceedings. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 301–313. ISBN: 978-3-658-13254-5. DOI: 10.1007/978-3-658-13255-2_23.
- [97] **Law, K.-Y.; Zhao, H.:** *Surface Wetting. Characterization, Contact Angle, and Fundamentals*. 1st edition 2016. Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2016. ISBN: 978-3-319-25214-8. DOI: 10.1007/978-3-319-25214-8.
- [98] **Lee, S.-H.** et al.: „Numerical Study on Aerodynamic Lift on Windshield Wiper of High-Speed Passenger Vehicles“. In: *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B* 35.4 (2011), S. 345–352. ISSN: 1226-4881. DOI: 10.3795/KSME-B.2011.35.4.345.
- [99] **Leonard, B. P.:** „Locally Modified QUICK Scheme for Highly Convective 2-D and 3-D Flows“. In: *Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow*. Hrsg. von **Taylor, C.** Swansea: Pineridge Press, 1987, S. 35–47. ISBN: 978-0906674642.
- [100] **Levy, B.; Brancher, P.:** „Topology and dynamics of the A-pillar vortex“. In: *Physics of Fluids* 25.3 (2013), S. 037102. ISSN: 1070-6631. DOI: 10.1063/1.4792710.
- [101] **Levy, B.; Brancher, P.:** „Experimental investigation of the wall dynamics of the A-pillar vortex flow“. In: *Journal of Fluids and Structures* 55 (2015), S. 540–545. ISSN: 08899746. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2015.03.020.
- [102] **Levy, B.; Brancher, P.; Giovannini, A.:** *Experimental characterization of the flow topology around a vehicle A-pillar using PIV and fluctuating wall pressure*. 2008.
- [103] **Li, H.; Shen, T.; Vavylonis, D.; Huang, X.:** „Actin Filament Tracking based on Particle Filters and Stretching Open Active Contour Models“. In: *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention* 12.2 (2009), S. 673–681. DOI: 10.1007/978-3-642-04271-3_82.
- [104] **Li, H.** et al.: „Automated Actin Filament Segmentation, Tracking and Tip Elongation Measurements based on Open Active Contour Models“. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Biomedical Imaging* (2009), S. 1302–1305. DOI: 10.1109/ISBI.2009.5193303.
- [105] **Lindner, N. W.:** „Numerical Simulation of Complex Wetting“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2015. URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4361>.
- [106] **Liu, A. B.; Mather, D.; Reitz, R. D.:** „Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays“. In: *SAE Technical Paper* 930072 (1993). DOI: 10.4271/930072.
- [107] **Loch, E.:** „The Level Set Method for Capturing Interfaces with Applications in Two-Phase Flow Problems“. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen, 2013.
- [108] **Lombardi, G.; Ercoli, A.; Maganzi, M.; Angeli, G. de:** „Comparison of two Multiphase Procedures on a Commercial Vehicle in Rain Conditions“. In: *International Journal of Automotive Technology* 20.6 (2019), S. 1123–1129. DOI: 10.1007/s12239-019-0105-9.

-
- [109] **Malvern Instruments Limited:** *Spraytec. Accurate Particle Sizing for Aerosols and Sprays*. 2016. URL: www.malvernpanalytical.com.
- [110] **Manzke, M.; Voss, J.-P.; Rung, T.:** „Sub-Cycling Strategies for Maritime Two-Phase Flow Simulations“. In: *Recent Developments in the Numerics of Nonlinear Hyperbolic Conservation Laws*. Hrsg. von **Ansorge, R.; Bijl, H.; Meister, A.; Sonar, T.** Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. Berlin: Springer-Verlag, 2013, S. 237–251. ISBN: 978-3-642-33221-0. DOI: 10.1007/978-3-642-33221-0_14.
- [111] **Marchand, A.; Weijs, J. H.; Snoeijer, J. H.; Andreotti, B.:** „Why is surface tension a force parallel to the interface?“ In: *American Journal of Physics* 79.10 (2011), S. 999–1008. ISSN: 0002-9505. DOI: 10.1119/1.3619866.
- [112] **Maroteaux, F.; Llory, D.; Le Coz, J.-F.; Habchi, C.:** „Liquid Film Atomization on Wall Edges, Separation Criterion and Droplets Formation Model“. In: *Journal of Fluids Engineering* 124.3 (2002), S. 565–575. ISSN: 00982202. DOI: 10.1115/1.1493811.
- [113] **Menter, F. R.:** „Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications“. In: *AIAA Journal* 32.8 (1994), S. 1598–1605. ISSN: 0001-1452. DOI: 10.2514/3.12149.
- [114] **Meredith, K.; Xin, Y.; Vries, J. d.:** „A Numerical Model for Simulation of Thin-Film Water Transport over Solid Fuel Surfaces“. In: *Fire Safety Science* 10 (2011), S. 415–428. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.10-415.
- [115] **Meredith, K. V.; Vries, J. d.; Xin, Y.:** „A numerical model for partially-wetted flow of thin liquid films“. In: *Multiphase Flow* 70 (2011), S. 239–250. DOI: 10.2495/MPF110201.
- [116] **Meredith, K. V.; Zhou, X.; Heather, A.:** „A Spray Interaction Model with Application to Surface Film Wetting“. In: *12th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems* (2012).
- [117] **Midwest Optical Systems Inc:** *MidOpt BP470. Datenblatt*. Palatine, USA, 2017.
- [118] **Muzaferija, S.; Peric, M.:** „Computation of Free Surface Flows Using Interface-Tracking and Interface-Capturing Methods“. In: *Nonlinear Water Wave Interaction*. Hrsg. von **Mahrenholtz, O.; Markiewicz, M.** International series on advances in fluid mechanics. Southampton: Wit Press, 1999, S. 59–100. ISBN: 978-1-85312-545-4.
- [119] **Noh, W. F.; Woodward, P.:** „SLIC (Simple Line Interface Calculation)“. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics June 28 – July 2, 1976 Twente University, Enschede*. Hrsg. von **Ehlers, J.** et al. Bd. 59. Lecture Notes in Physics. Berlin: Springer-Verlag, 1976, S. 330–340. ISBN: 978-3-540-08004-6. DOI: 10.1007/3-540-08004-X_336.
- [120] **O’Brien, S. B. G.; Schwartz, L. W.:** „Theory and Modeling of Thin Film Flows“. In: *Encyclopedia of Surface and Colloid Science* (2002).
- [121] **O’Rourke, P. J.; Amsden, A. A.:** „A Particle Numerical Model for Wall Film Dynamics in Port-Injected Engines“. In: *SAE Technical Paper Series* (1996). DOI: 10.4271/961961.

- [122] **Oseen, C. W.:** *Neuere Methoden und Ergebnisse in der Hydromechanik*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1927.
- [123] **Persson, D.; Nilvé, E.:** „Exterior Water Flow Simulation. A Simulation Study of a Car to Provide Design Guidelines for Future Car“. Masterarbeit. Lund, Schweden: Lund University, 2018.
- [124] **Pessoni, D. H.; Chao, B. T.:** „A simple technique for turbulence measurements in nonisothermal air flows“. In: *Proceedings of the Fifth International Heat Transfer Conference*. Hrsg. von **Kaigi, N. G.; Kyōkai, K. K.; Gakkai, N. K.** Tokyo, Japan: Japan Society of Mechanical Engineers, 1974, S. 278–282.
- [125] **Pfeifer, T.:** *Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken*. 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser, 1996. ISBN: 978-3446185791.
- [126] **Pilch, M.; Erdman, C. A.:** „Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop“. In: *International Journal of Multiphase Flow* 13.6 (1987), S. 741–757. ISSN: 03019322. DOI: 10.1016/0301-9322(87)90063-2.
- [127] **Popat, B. C.:** „Study of Flow and Noise Generation from Car A-pillars“. Ph. D. Thesis. London: University of London, 1991.
- [128] **Potthoff, J.:** *Untersuchung der Verschmutzung von Kraftfahrzeugen im Windkanal*. Düsseldorf: VDI-Jahrestagung Fahrzeugtechnik, 1974.
- [129] **Qioptiq Photonics GmbH & CO KG:** *MeVis-C, MeVis-Cm and MeVis-CF. High-Resolution Inspection Lenses*. Göttingen, 2011.
- [130] **Rettenmaier, D.:** „Numerical Simulation of Shear Driven Wetting“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2019. URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8510>.
- [131] **Rider, W. J.; Kothe, D. B.:** „Reconstructing Volume Tracking“. In: *Journal of Computational Physics* 141.2 (1998), S. 112–152. DOI: 10.1006/jcph.1998.5906.
- [132] **Sadakata, O.; Kanamaru, K.; Kakamu, T.:** „A Consideration Of Wind Noise Reduction By Air Flow Control“. In: *SAE Technical Paper* 885115 (1988). DOI: 10.4271/885115.
- [133] **SAE International:** *Motor Vehicle Fiducial Marks and Three-Dimensional Reference System*. 2015. URL: https://www.sae.org/standards/content/j182_201507.
- [134] **Sanon, A.; Jallet, S.:** „Acoustic Sources Localization. Application to Wiper Aerodynamic Noises“. In: *SAE Noise & Vibration Conference and Exhibition* (2003). DOI: 10.4271/2003-01-1700.
- [135] **Schäfer, M.:** *Numerik im Maschinenbau*. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer-Verlag, 1999. ISBN: 978-3-642-58416-9. DOI: 10.1007/978-3-642-58416-9.
- [136] **Schäufele, S.:** „Validierung der neuen Windkanäle im Aerodynamischen Versuchszentrum der BMW Group und Analyse der Übertragbarkeit der Ergebnisse“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2010. URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000022203>.

- [137] **Schiller, L.; Naumann, A.:** „Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung“. In: *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure* 77 (1933), S. 318–320.
- [138] **Schneider, H.; Niegisch, N.; Mennig, M.; Schmidt, H.:** „Hydrophilic Coating Materials“. In: *Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users*. Hrsg. von **Aegerter, M. A.; Mennig, M.** Boston, MA: Springer US, 2004, S. 187–194. ISBN: 978-1-4419-5455-8. DOI: 10.1007/978-0-387-88953-5_26.
- [139] **Schütz, T.,** Hrsg.: *Hucho - Aerodynamik des Automobils. Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort mit 49 Tabellen*. 6. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. ATZ / MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3834819192. DOI: 10.1007/978-3-8348-2316-8.
- [140] **Schütz, T.:** *Fahrzeugaerodynamik. Basiswissen für das Studium*. ATZ / MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN: 978-3658128173.
- [141] **Schwarz, V.; Jehle-Graf, E.:** „Aerodynamikentwicklung der neuen A-Klasse“. In: *Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren*. Hrsg. von **Bargende, M.; Wiedemann, J.; Reuss, H.-C.** Renningen: Expert-Verlag, 2005, S. 505–519. ISBN: 9783816924869.
- [142] **Seiler, P. M. R.:** „Aerodynamically Driven Wall-Bounded Drop Motion and Rivulet Formation“. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2019. URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8268>.
- [143] **Shur, M. L.; Spalart, P. R.; Strelets, M. K.; Travin, A. K.:** „A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities“. In: *International Journal of Heat and Fluid Flow* 29.6 (2008), S. 1638–1649. ISSN: 0142727X. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001.
- [144] **Sieber, M.; Paschereit, C. O.; Oberleithner, K.:** „Spectral Proper Orthogonal Decomposition“. In: *Journal of Fluid Mechanics* 792 (2016), S. 798–828. DOI: 10.1017/jfm.2016.103.
- [145] **Siemens PLM Software:** *Simcenter STAR-CCM+ Dokumentation. Version 2019.1*. 2019.
- [146] **Smith, M. B. et al.:** „Segmentation and Tracking of Cytoskeletal Filaments using Open Active Contours“. In: *Cytoskeleton* 67.11 (2010), S. 693–705. DOI: 10.1002/cm.20481.
- [147] **Song, L.; Hennink, E. J.; Young, I. T.; Tanke, H. J.:** „Photobleaching kinetics of fluorescein in quantitative fluorescence microscopy“. In: *Biophysical Journal* 68.6 (1995), S. 2588–2600. ISSN: 00063495. DOI: 10.1016/S0006-3495(95)80442-X.
- [148] **Spraying Systems Co:** *Düsen und Zubehör für die Industrie. Hauptkatalog 70M-D*. Wheaton, USA, 2019. URL: https://www.spray.de/Assets/DE/C70-M-D_Katalog_complete.pdf.
- [149] **SprayPatternator:** *SprayPatternator. Efficient Nozzle Inspection*. 2020. URL: <https://www.spray-patternator.com>.
- [150] **Spruß, I.:** „Ein Beitrag zur Untersuchung der Kraftfahrzeugverschmutzung in Experiment und Simulation“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2015.

- [151] **Spruß, I.** et al.: „Spray Pattern of a Free Rotating Wheel - CFD Simulation and Validation“. In: *Progress in Vehicle Aerodynamics and Thermal Management*. Hrsg. von **Wiedemann, J.**; **Brehm, H.** Renningen: Expert-Verlag, 2011, S. 64–80. ISBN: 978-3-8169-3116-4.
- [152] **Spurk, J. H.**; **Aksel, N.**: *Strömungslehre. Einführung in die Theorie der Strömungen*. 8. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer-Verlag, 2010. ISBN: 978-3-642-13143-1. DOI: 10.1007/978-3-642-13143-1. URL: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10408120>.
- [153] **Stanton, D. W.**; **Rutland, C. J.**: „Multi-dimensional modeling of thin liquid films and spray-wall interactions resulting from impinging sprays“. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 41.20 (1998), S. 3037–3054. ISSN: 00179310. DOI: 10.1016/S0017-9310(98)00054-4.
- [154] **Steger, J. L.**; **Dougherty, F. C.**; **Benek, J. A.**: „A Chimera Grid Scheme. Multiple Overset Body-Conforming Mesh System For Finite Difference Adaptation To Complex Aircraft Configurations“. In: *American Society of Mechanical Engineers* (1983), S. 59–69. URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19840028795>.
- [155] **Stemmer Imaging**: *Allied Vision Prosilica GT 2450. Datenblatt*. Puchheim, 2015.
- [156] **Tränkler, H.-R.**; **Obermeier, E.**, Hrsg.: *Sensortechnik. Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Berlin: Springer-Verlag, 1998. ISBN: 978-3-662-09866-0. DOI: 10.1007/978-3-662-09866-0.
- [157] **Travin, A. K.**; **Shur, M. L.**; **Spalart, P. R.**; **Strelets, M. K.**: „Improvement of Delayed Detached-Eddy Simulation for LES with Wall Modelling“. In: *European Conference on Computational Fluid Dynamics ECOMAS CFD* (2006).
- [158] **Trela, M.**: „A semi-theoretical model of stability of vertical falling liquid films“. In: *Chemical Engineering Science* 49.7 (1994), S. 1007–1013. ISSN: 00092509. DOI: 10.1016/0009-2509(94)80007-3.
- [159] **Tropea, C.** et al.: „External Water Management: A Predictive Challenge“. In: *19. Internationales Stuttgarter Symposium*. Hrsg. von **Bargende, M.**; **Reuss, H.-C.**; **Wiedemann, J.** Proceedings. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 398–411. ISBN: 978-3-658-25938-9. DOI: 10.1007/978-3-658-25938-9_35.
- [160] **Tropea, C.** et al.: „Optimieren der Wasserführung: Eine simulative Herausforderung“. In: 19. Internationales Stuttgarter Symposium. Stuttgart, 19.03.2019–20.03.2019.
- [161] **Tropea, C.** et al.: „Wetting Questions in Vehicle External Water Management“. In: 694. WE-Heraeus-Seminar (Wetting on Soft or Microstructured Surfaces). Bad Honnef, 11.04.2019–13.04.2019. URL: <https://www.we-heraeus-stiftung.de/veranstaltungen/seminare/2019/wetting-on-soft-or-microstructured-surfaces/main>.
- [162] **Vollmer, H.**: „Neue Methoden zur Analyse der Benetzung von Pkw-Seitenscheiben“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2017. DOI: 10.1007/978-3-658-22488-2.
- [163] **Vollmer, H.** et al.: „Methode zur Bewertung der Sichtfreihaltung bei Regen“. In: Haus der Technik: Fahrzeug-Aerodynamik. München, 2014.

-
- [164] **Waclawczyk, T.; Koronowicz, T.:** „Comparison of CICSAM and HRIC High-Resolution Schemes for Interface Capturing“. In: *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* (2008), S. 325–345.
- [165] **Wenzel, R. N.:** „Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water“. In: *Industrial & Engineering Chemistry* 28.8 (1936), S. 988–994. DOI: 10.1021/ie50320a024.
- [166] **White, L. R.:** „On deviations from Young’s equation“. In: *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases* 73.0 (1977), S. 390. DOI: 10.1039/F19777300390.
- [167] **Widdecke, N.; Kuthada, T.; Wiedemann, J.:** „Moderne Verfahrensweisen zur Untersuchung der Fahrzeugverschmutzung“. In: Haus der Technik: Fahrzeug-Aerodynamik. München, 2001.
- [168] **Wolf, T.:** „Die Aerodynamikentwicklung des neuen Porsche Cayenne“. In: Haus der Technik: Fahrzeug-Aerodynamik. München, 2018.
- [169] **Yang, Z. G. et al.:** „Numerical Analysis on Aerodynamic Forces on Wiper System“. In: *Recent Progress in Fluid Dynamics Research*. Hrsg. von **Li, J.** AIP Conference Proceedings. Melville, NY: American Institute of Physics, 2011, S. 213–217. ISBN: 978-0735409361. DOI: 10.1063/1.3651879.
- [170] **Young, T.:** „An essay on the cohesion of fluids“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 95 (1805), S. 65–87. DOI: 10.1098/rstl.1805.0005.
- [171] **Zhengqi, G.; Zhen, C.; Peng, T.:** „Research on the Aerodynamic Lift of Vehicle Windshield Wiper“. In: *Journal of Applied Fluid Mechanics* 9.7 (2016), S. 2133–2140. DOI: 10.18869/acadpub.jafm.68.236.25096.
- [172] **Zivkov, V.:** „Experimentelle und numerische Untersuchungen der aerodynamischen Kraftfahrzeugeigenverschmutzung“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2004. URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000000377>.

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
AVZ	Aerodynamisches Versuchszentrum
AWK	Aerodynamischer Windkanal
BMW	Bayerische Motoren Werke
CAD	Computer-Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamic
CFL	Courant Friedrichs Lewy
DDES	Delayed Detached Eddy Simulation
DES	Detached Eddy Simulation
EVZ	Energietechnisches Versuchszentrum
EWM	External Water Management
FIZ	Forschungs- und Innovationszentrum
HRIC	High-Resolution Interface Capturing
IDDES	Improved Delayed Detached Eddy Simulation
LED	Light-Emitting Diode (Leuchtdiode)
LES	Large Eddy Simulation
OSM	Overset-Mesh
OWL	Obere Wendelage
PID	Property Identifier
PIV	Particle Image Velocimetry
Pkw	Personenkraftwagen
PLIC	Piecewise Linear Interface Calculation
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
SLIC	Simple Line Interface Calculation
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
TU	Technische Universität
UV	Ultraviolett

UWK	Umweltwindkanal
UWL	Untere Wendelage
VOF	Volume-of-Fluid
WFL	Wasserfangleiste

Symbolverzeichnis

Die folgende Liste zeigt die in dieser Arbeit verwendeten Symbole für die physikalischen und mathematischen Größen. Die letzte Spalte gibt jeweils die Dimension der Größe als Potenzprodukt der sieben Basisgrößen Masse M , Länge L , Zeit T , Temperatur Θ , Stoffmenge N , Strom I und Lichtstärke J an.

Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Dimension
A	Fläche	L^2
A_f	Querschnittsfläche Filmmodell	L^2
A_x	Stirnfläche	L^2
\tilde{A}	Amplitude	–
b	Breite	L
b_f	Filmbreite	L
b_r	Rinnsalbreite	L
\dot{B}	Flüssigkeitsbelastung	L^2T^{-1}
B_G	Benetzungsgrad	–
Bo	Bondzahl	–
c_{df}	Widerstandsbeiwert des Films	–
c_{dp}	Widerstandsbeiwert des Partikels	–
$c_{d,Kugel}$	Widerstandsbeiwert einer Kugel	–
c_p	Statischer Druckbeiwert	–
c_{pt}	Totaldruckbeiwert	–
c_x	Widerstandsbeiwert	–
c_y	Seitenkraftbeiwert	–
c_z	Auftriebsbeiwert	–
c_s	Stoffmengenkonzentration	$L^{-3}N$
\tilde{C}_i	Parameter	–
Ca	Kapillarzahl	–
d	Länge der Film- und Rinnsalbenetzung	L
d_p	Partikeldurchmesser	L
d_s	Schichtdicke	L
e	Eulersche Zahl	–
f	Frequenz	T^{-1}
F_i	Kraft	MLT^{-2}
F_x	Luftwiderstandskraft	MLT^{-2}
F_y	Seitenkraft	MLT^{-2}
F_z	Auftriebskraft	MLT^{-2}
g	Fallbeschleunigung	LT^{-2}
h	Höhe	L
h_f	Filmhöhe	L
I	Intensität	MT^{-3}

I_A	Abgeschwächte, transmittierte Intensität	MT^{-3}
I_E	Einfallende Intensität	MT^{-3}
I_F	Fluoreszenzintensität	MT^{-3}
I_V	Verlustintensität	MT^{-3}
k	Turbulente kinetische Energie	L^2T^{-2}
K_F	Kontaminationsfaktor	–
l	Länge	L
l_B	Fahrzeugbreite	L
l_H	Fahrzeughöhe	L
l_L	Fahrzeuglänge	L
l_r	Lauflänge der Rinnsale	L
l_{kap}	Kapillarlänge	L
l^+	Dimensionslose Länge	–
L	Charakteristische Länge	L
\dot{m}	Massenstrom	MT^{-1}
\dot{m}_{zu}	Zugeführter Massenstrom	MT^{-1}
m_p	Partikelmasse	M
M_x	Rollmoment	ML^2T^{-2}
M_y	Nickmoment	ML^2T^{-2}
M_z	Giermoment	ML^2T^{-2}
n	Anzahl	–
n_i	Einheitsnormalenvektor	–
n_p^*	Anzahl der Phasen	–
n_s	Koordinate senkrecht zur Oberfläche	–
N_P	Gesamtanzahl der Pixel	–
p	Druck	$ML^{-1}T^{-2}$
p_∞	Referenzdruck	$ML^{-1}T^{-2}$
p_i	Druck	$ML^{-1}T^{-2}$
p_s	Statischer Druck	$ML^{-1}T^{-2}$
p_t	Totaldruck	$ML^{-1}T^{-2}$
q_∞	Dynamischer Druck der ungestörten Anströmung	$ML^{-1}T^{-2}$
Q_m	Massenstrom pro Flächeneinheit	$ML^{-2}T^{-1}$
r	Radius	L
R_h	Regenintensität	LT^{-1}
R_{wdr}	Windgetriebene Regenintensität	LT^{-1}
Re	Reynoldszahl	–
Re_f	Filmreynoldszahl	–
Re_{krit}	Kritische Reynoldszahl	–
Re_p	Partikelreynoldszahl	–
S_i	Quellterm	–
t	Zeit	T
u	Geschwindigkeitskomponente (in x -Richtung)	LT^{-1}
u_∞	Geschwindigkeit der ungestörten Anströmung	LT^{-1}
u_{fall}	Fallgeschwindigkeit der Tropfen	LT^{-1}

u_{kl}	Kontaktliniengeschwindigkeit	LT^{-1}
u_L	Luftgeschwindigkeit	LT^{-1}
u_p	Partikelgeschwindigkeit	LT^{-1}
u_r	Rinnsalfließgeschwindigkeit	LT^{-1}
u_{rel}	Relative Strömungsgeschwindigkeit	LT^{-1}
u_{wind}	Windgeschwindigkeit	LT^{-1}
\bar{u}_i	Mittlere Geschwindigkeit	LT^{-1}
u^+	Dimensionslose Geschwindigkeit	–
U	Spannung	$ML^2I^{-1}T^{-3}$
v	Geschwindigkeitskomponente (in y -Richtung)	LT^{-1}
V_i	Volumen	L^3
\dot{V}	Volumenstrom	L^3T^{-1}
w	Geschwindigkeitskomponente (in z -Richtung)	LT^{-1}
w_i	Gewichtungsfaktoren	–
We	Weberzahl	–
x	Koordinate	L
x_n	Abstand in Normalenrichtung	L
y^+	Dimensionsloser Wandabstand	–
y	Koordinate	L
z	Koordinate	L

Griechische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Dimension
α_{p^*}	Volumenanteil der Phase P^*	–
α_{trans}	Grenzwert für Wasservolumenanteil beim hybriden Modell	–
α_{Zelle}	Wasservolumenanteil in einer Zelle	–
α_σ	Skalierungsfaktor	–
β	Winkel	–
β_σ	Skalierungsfaktor	–
δ	Standardabweichung	–
$\Delta \dot{m}$	Massenstromdifferenz	MT^{-1}
Δt	Diskrete Zeitschrittweite	T
Δu	Geschwindigkeitsdifferenz	LT^{-1}
Δx	Diskrete Raumschrittweite	L
$\Delta \theta$	Kontaktwinkelschwankung	–
ε	Dissipationsrate	L^2T^{-3}
ε_s	Extinktionskoeffizient	L^2N^{-1}
ζ	Verzerrungsparameter	–
θ	Kontaktwinkel	–
θ_a	Fortschreitender Kontaktwinkel (advancing contact angle)	–
θ_r	Rückschreitender Kontaktwinkel (receding contact angle)	–
$\bar{\theta}$	Mittlerer Kontaktwinkel	–

λ	Wellenlänge	L
μ	Dynamische Viskosität	$ML^{-1}T^{-1}$
μ_{p^*}	Dynamische Viskosität der Phase P^*	$ML^{-1}T^{-1}$
ν	Kinematische Viskosität	L^2T^{-1}
π	Kreiszahl	–
ρ	Dichte	ML^{-3}
ρ_f	Filmdichte	ML^{-3}
ρ_p	Dichte der Partikel	ML^{-3}
ρ_{p^*}	Dichte der Phase P^*	ML^{-3}
σ	Oberflächenspannung	MT^{-2}
σ_{fg}	Oberflächenenergie der Flüssigkeit	MT^{-2}
σ_{sf}	Spezifische Grenzflächenenergie	MT^{-2}
σ_{sg}	Freie spezifische Oberflächenenergie	MT^{-2}
τ_i	Schubspannung	$ML^{-1}T^{-2}$
τ_w	Wandschubspannung	$ML^{-1}T^{-2}$
τ_w^+	Dimensionslose Wandschubspannung	–
$\dot{\varphi}$	Winkelgeschwindigkeit	T^{-1}
Φ	abhängige Variable	–
Ψ	Skalierungsfaktor	–
ω	Dissipationsfrequenz	T^{-1}

Abbildungsverzeichnis

1.1	Bewertungsphasen der verschiedenen Entwicklungsstände und Potential der frühzeitigen, virtuellen Bewertung mithilfe von Simulationen	6
2.1	Gegenüberstellung der beiden numerischen Ansätze zur Simulation der Fahrzeugberegnung	12
3.1	Fahrzeugfestes Koordinatensystem mit den am Fahrzeug angreifenden Kräften und Momenten	17
3.2	Benetzbarkeit und Benetzung am Beispiel eines auf einer horizontalen Oberfläche aufgetragenen Flüssigkeitstropfens	21
3.3	Schematische Darstellung der zwischenmolekularen Bindungen im Phaseninneren und nahe der Phasengrenze	22
3.4	Darstellung des youngschen Kräftegleichgewichts und Definition des Kontaktwinkels an der Dreiphasengrenze	24
3.5	Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Kontaktwinkel und Kapillardzahl	25
3.6	Wasserpfad am Fahrzeugexterieur bei einer Regenfahrt	26
3.7	Am Fahrzeug abgeleitete Grundlagenexperimente mit Verweis auf die jeweils relevanten Abschnitte in dieser Arbeit	26
3.8	Querschnitt einer A-Säule mit Wasserfangleiste und Dichtungen	27
3.9	Sensitive Bereichen zur Beeinflussung der Seitenscheibenbenetzung	28
4.1	AeroLab der BMW Group	32
4.2	Umweltwindkanal der BMW Group	33
4.3	Aufbau des Messsystems im Umweltwindkanal mit Positionen der Kameras und UV-LED-Strahler	33
4.4	Spektrum der normierten Absorption und Emission des Fluoreszenzmittels Tinopal SFP	34
4.5	Kalibrierlehre mit verschiedenen tiefen Becken (links) und schematische Abhängigkeit zwischen Helligkeit und Filmhöhe (rechts)	36
4.6	Zeitliche Abnahme der Fluoreszenzintensität bei permanenter Bestrahlung mit Anregungslicht	38
4.7	Schematische Darstellung des Fluidfilms mit relevanten Parametern	42
4.8	Zweidimensionales Beispiel zur Rekonstruktion der Phasengrenze anhand des Volumenanteils mittels geometrischer Ansätze	47
4.9	Schematische Skizze zum hybriden Fluidfilm-VOF-Mehrphasenmodell	50

4.10	Ansätze zur Darstellung von Netzbewegungen	51
4.11	Überlappungsbereich von Overset-Region (schwarze Gitterlinien) und Hintergrundregion (graue Gitterlinien) mit aktiven/inaktiven Zellen und Interpolationzellen sowie Interpolationsschema mit Spenderzellen (D) und Empfängerzellen (A)	54
4.12	Flussdiagramm zur Strömungsberechnung von überlappenden (und bewegten) Gittern	55
5.1	Befestigung der Hitzdrahtsonde mit einem Saugfuß an der Seitenscheibe . . .	60
5.2	Vor und nach den Messungen bestimmte Kalibrierkurve der Hitzdrahtsonde (links) und Geschwindigkeitsprofil von Messpunkt 1 mit unterschiedlichen Abtastungen des wandnormalen Abstands (rechts)	61
5.3	Abmessungen und Randbedingungen des numerischen Simulationsgebiets in der Draufsicht (links) und der Seitenansicht (rechts), nicht maßstabsgetreu .	62
5.4	Räumliche Diskretisierung von Versuchsfahrzeug und Simulationsvolumen in der Mittelschnittebene	63
5.5	Grenzschichtprofile von Messung (schwarz) und Simulation mit vereinfachter A-Säulengeometrie (blau)	65
5.6	Querschnitt der vereinfachten (blaue Kontur) und der detaillierten (orange Kontur) A-Säule	66
5.7	Grenzschichtprofile von Messung (schwarz) und Simulation mit detaillierter A-Säulengeometrie (orange)	67
5.8	Fädchen auf der Seitenscheibe der BMW 3er Limousine bei einer Anströmgeschwindigkeit von 80 km h^{-1}	68
5.9	Strömungsrichtung nahe der Seitenscheibe des Experiments (schwarze Vektoren) und der detaillierten Simulation (orange Vektoren)	69
5.10	Schematische Darstellung der Strömung um die A-Säule	69
5.11	Aufbau des wasserfesten, vertikalen Windkanals der Technischen Universität Darmstadt	71
5.12	Streubreite der Benetzungsmuster im Experiment bei gleichen Randbedingungen für Anströmgeschwindigkeit und Wasservolumenstrom	73
5.13	Gegenüberstellung der Benetzungsmuster aus Simulation (links) und Experiment (rechts) bei einer Anströmgeschwindigkeit von 8 m s^{-1} und einem Wasservolumenstrom von 500 ml min^{-1}	74
5.14	Grafische Auswertung der Benetzungsmuster mittels Matlab am Beispiel eines Bildausschnitts einer Simulation	75
5.15	Benetzter Anteil der Platte für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten . . .	75
5.16	Charakteristische Rinnsalkenngrößen der Benetzung über verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten	76
5.17	Mittlere Rinnsalbreite über der Lauflänge mit Standardabweichung der Experimente für die Anströmgeschwindigkeiten 8 m s^{-1} und 24 m s^{-1}	77
5.18	Vom Fahrzeug abgeleitete Hintergrundregion mit einem Schieber als Ersatz für den Scheibenwischer in der orange hervorgehobenen Overset-Region.	78
5.19	Voruntersuchungen am Testfall zur Scheibenwischersimulation mit verschiedenen gestalteten Kanten	80

5.20	Begrenzung des Simulationsvolumens auf den dargestellten Fahrzeugausschnitt mit orange markierten Overset-Regionen der Scheibenwischer	83
5.21	Räumliche Diskretisierung der Fahrzeugausschnitte durch Hexaeder mit Wandschichtauflösung, Polyeder mit Wandschichtauflösung und Polyeder mit universellem Wandgesetz jeweils in der Mittelschnittebene	84
5.22	Dimensionsloser Druckbeiwert über der dimensionslosen Fahrzeuglänge in der Fahrzeugmittelebene und in einer um 200 mm in negative y -Richtung verschobenen Ebene zur Fahrzeugmitte	85
5.23	Dimensionsloser Druckbeiwert über der dimensionslosen Fahrzeugbreite in der Ebene bei $x = 1,40$ m	86
5.24	Gemittelte, dimensionslose Geschwindigkeit in der Fahrzeugmittelebene für die Simulationen am Gesamtfahrzeug und den drei Fahrzeugausschnitten	88
5.25	Gemittelte, dimensionslose Geschwindigkeit in der Ebene $x = 1,50$ m für die Simulationen am Gesamtfahrzeug und den drei Fahrzeugausschnitten	89
6.1	Konstruktion des Wasseraustrittskörpers mit Beruhigungskammern	92
6.2	Wasserfang- und -führungskonstruktion des über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste abfließenden Wassers	94
6.3	Schematischer Versuchsaufbau des Fahrzeugs mit Wasseraustrittskörper auf der Fahrzeugdachkante	95
6.4	Versuchsaufbau im Umweltwindkanal	96
6.5	Unterteilung der Overset-Region eines Scheibenwischers	98
6.6	Bilderserie zur Geschwindigkeitsmagnitude der Scheibenwischer und der Frontscheibe.	99
6.7	Overset-Mesh-Status am Beispiel einer Schnittebene durch die Hintergrund- und die fahrerseitige Scheibenwischerregion	100
6.8	Simulationsdomain am Beispiel des Wasseraustrittskörpers mit orange gehobener Shell	101
6.9	Detaillierungsgrad der Scheibenwischer in der Simulation	104
6.10	Domain der Validierungssimulation mit Darstellung des Oberflächennetzes an ausgewählten Stellen der Wasserfangleiste und der Zierleiste sowie dem Übergangsbereich auf der Frontscheibe	105
6.11	Instantane Wandschubspannung auf der Fahrzeugaußenhaut bei der Anströmgeschwindigkeit von 80 km h^{-1} und der oberen Wendelage der Scheibenwischer	106
6.12	Verlauf des Widerstandskoeffizienten der beiden Scheibenwischer über einem kompletten Zyklus	107
6.13	Druckmode auf der vorderen, linken Seitenscheibe des Fahrzeugs	108
6.14	Ermittlung des eingeschwungenen Zustands in der Simulation	109
6.15	Vergleich der Frontansicht von Experiment (links) und Simulation (rechts) mit vorgegebenem Kontaktwinkelteppich für die Standard-Wasserfangleiste mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 0 m s^{-1}	110
6.16	Vergleich der Seitenansicht von Experiment (links) und Simulation (rechts) für die Standard-Wasserfangleiste mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 0 m s^{-1}	112

6.17	Vergleich der Seitenansicht von Experiment (links) und Simulation (rechts) für die geschlossene Wasserfangleiste mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 0 m s^{-1}	113
6.18	Prozentualer Anteil des über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste abfließenden Wassers für verschiedene A-Säulenvarianten ohne Luftanströmung . .	114
6.19	Vorgehen zur Bestimmung der Rinnsalfließgeschwindigkeit mit einer aktiven Kontur (blaue Linie) am Beispiel des markierten Ausschnitts	115
6.20	Fließgeschwindigkeit der Rinnsale während der Scheibenwischerbewegung für Experimente und Simulationen zur Standard-Wasserfangleiste bei einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 0 m s^{-1}	117
6.21	Vergleich der Frontansicht von Experiment (links) und Simulation (rechts) mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 10 m s^{-1}	119
6.22	Vergleich der Seitenansicht von Experiment (links) und Simulation (rechts) für die Standard-Wasserfangleiste mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 10 m s^{-1} zum Zeitpunkt des Wasserübertritts an der A-Säule	120
6.23	Gegenüberstellung des Rinnsalverlaufs beim Übergang über die A-Säule für die Standard-Wasserfangleiste mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 10 m s^{-1} zum Zeitpunkt des Wasserübertritts an der A-Säule	122
6.24	Vergleich der Seitenansicht von Experiment (links) und Simulation (rechts) für die Standard-Wasserfangleiste mit einer Luftanströmungsgeschwindigkeit von 10 m s^{-1} und reduziertem Kontaktwinkel auf der A-Säule	123
6.25	Prozentualer Anteil des über die Frontscheibe und die Wasserfangleiste abfließenden Wassers für verschiedene A-Säulenvarianten bei einer Luftanströmung mit 10 m s^{-1}	123
7.1	Eine detaillierte Strömungssimulation und eine Lagrange-Partikel-Simulation am gesamten Fahrzeug dienen als Anfangs- und Randbedingungen für die Mehrphasensimulation am Fahrzeugausschnitt	128
7.2	Frontansicht der nachkonstruierten Frontscheibe mit Aussparungen für den Einsatz von 3D-gedruckten Auffangtrichtern und Beispiel einer Auffangtrichtereinheit	131
7.3	Typische Phänomene der Seitenscheibenbenetzung mit Markierung des Sichtfensters in der Seitenscheibe	133
7.4	Gemittelte, dimensionslose Wandschubspannung und Stromlinien auf der Seitenscheibe bei einer Anströmgeschwindigkeit von 80 km h^{-1}	134
7.5	Wasserfilm auf der Frontscheibe für die Simulationsmethodik bei bewegten Scheibenwischern und einer Anströmgeschwindigkeit von 120 km h^{-1}	136
7.6	Benetzungshäufigkeit auf der Seitenscheibe beim klassischen Beregnungsversuch im UWK (links) und in der numerischen Simulation (rechts) für die detaillierte A-Säulenkontur unter Luftanströmung mit 120 km h^{-1}	136
7.7	Benetzungshäufigkeit auf der Seitenscheibe für zwei verschiedene A-Säulengeometrien bei einer Luftanströmung mit 120 km h^{-1}	137

Tabellenverzeichnis

4.1	Übersicht zu Anzahl der Volumenzellen und benötigte Rechenzeit für eine physikalische Sekunde der verschiedenen Simulationsfälle	56
5.1	Definition der Messpunkte auf der Seitenscheibe	61
5.2	Unterschiede in den Simulationen am Fahrzeugausschnitt	84
6.1	Gewählte Modelle bei der Scheibenwischersimulation	102
6.2	Mittlere Rinnsalfließgeschwindigkeit und deren Standardabweichung für Experimente und Simulationen ohne Luftanströmung mit der Standard-Wasserfangleiste und der geschlossenen Wasserfangleiste	118
6.3	Mittlere Rinnsalfließgeschwindigkeit und deren Standardabweichung für Experimente und Simulationen mit einer Luftanströmung von 10 m s^{-1} mit der Standard-Wasserfangleiste und der geschlossenen Wasserfangleiste	124
7.1	Sprühcharakteristik der verwendeten Fulljet 2.8W Düse	129
7.2	Resultierende Sprühkegel bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten	130